

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ NOVÝCH KONSTRUKČNÍCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

EFFECTIVE MACHINING OF ADVANCED STRUCTURAL CERAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ANTONÍN JURÁN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2009

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na nové konstrukční keramické materiály z hlediska jejich struktury, vlastností, výroby, rozdělení, použití a možnosti efektivního obrábění. Keramické materiály jsou stále častěji používány i v oblasti konstrukčních aplikací, ve formě kompaktních součástí nebo ve formě tenkých povlaků na povrchu kovových dílců. Rychlý rozvoj konstrukčních aplikací vyžaduje, aby se také stejným tempem zlepšovaly obráběcí stroje a nové metody efektivního obrábění těchto materiálů. Cílem je vyrobit součásti požadovaných tvarů, rozměrů a jakosti povrchu za přijatelnou cenu (při přijatelných nákladech). Keramické materiály nám zaručují dlouhou trvanlivost a spolehlivost. V poslední části diplomové práce je vyhodnocení zkoušek broušení keramických materiálů z hlediska řezných sil a jakosti povrchu obrobené plochy.

Klíčová slova

Keramické materiály, metody obrábění, měření řezných sil, jakost obrobeného povrchu a vyhodnocení zkoušek broušení keramických materiálů.

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis are new design materials in a view of their structure, properties, manufacture, partitions, applications and possibilities of effective machining them. Ceramics are used in the field of design applications more often than before. They are in form of compact parts and in form of thin coatings on the surface of metal parts. Fast development of constructive applications requires the same progress rate of machining machines innovations and development of new methods of effective machining these materials, too. The aim is to produce parts of demanded shapes, dimensions and surface quality at affordable costs. Ceramics guarantee long terming durability and reliability. The evaluation of ceramics grinding tests from the point of view of cutting forces and surface quality of the machined faces are presented in the last part of the diploma thesis.

Key words

Ceramics methods of machining, measurement of the cutting forces, surface quality of the machined face, ceramics grinding tests evaluation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JURÁN, Antonín. *Efektivní obrábění nových konstrukčních keramických materiálů: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 66 s., 10 příloh., doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Efektivní obrábění nových konstrukčních keramických materiálů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

13.10. 2009

.....
Antonín Jurán

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	6
Poděkování	7
Obsah	8
Úvod	10
1 Charakteristika keramických materiálů	11
1.1 Všeobecná charakteristika keramiky ^{5,6,11}	11
1.2 Struktura keramických materiálů, silikátů a skel ^{5,6,8}	12
1.2.1 Struktura krystalických keramických látek ^{6,8,11}	12
1.2.2 Struktura silikátů ^{6,8}	14
1.2.3 Skelné materiály ^{5,6,8}	14
1.3 Vlastnosti keramických materiálů	14
1.3.1 Elastické charakteristiky ^{5,11}	15
1.3.2 Plastické charakteristiky ^{5,6,8,11}	16
1.3.3 Pevnost keramiky ^{5,6,16}	17
1.3.4 Tvrdost keramiky ^{4,5,6,11}	19
1.3.5 Lomová houževnatost keramiky ^{5,6,8}	20
1.3.6 Únavové porušení keramických materiálů ⁸	20
1.4 Výroba keramických materiálů	20
1.4.1 Příprava práškové směsi ^{11,13}	21
1.4.2 Sušení ¹¹	21
1.4.3 Tvarování ^{8,11,13}	21
1.4.4 Tepelné zpracování	22
1.5 Rozdělení konstrukčních keramických materiálů	26
1.5.1 Keramika na bázi oxidu hlinitého ^{8,11}	27
1.5.2 Keramické materiály na bázi karbidu křemíku ^{8,11}	28
1.5.3 Keramické materiály na bázi nitridu křemíku ^{8,11}	29
1.5.4 Sialony ⁸	30
1.5.5 Keramika na bázi oxidu zirkoničitého ⁸	30
1.6 Použití konstrukčních keramických materiálů ^{8,13}	30
2 Metody obrábění keramických materiálů	32
2.1 Obrábění pomocí vytvoření trhliny	33
2.1.1 Vyvolání trhliny mechanickým způsobem ^{5,11}	33
2.1.2 Vyvolání trhliny energetickým působením ^{5,11}	34
2.2 Opracování s řízeným vedením jediné trhliny	36
2.2.1 Lámání s nařiznutím ^{5,11}	36
2.2.2 Sekání ^{5,11}	36
2.2.3 Dělení kontrolovaným lomem ^{5,11}	36
2.3 Opracování s oddělováním malých částic	37
2.3.1 Broušení ^{1,5,14,15}	37
2.3.2 Obrábění vodním paprskem ^{5,9,12}	40
2.3.3 Obrábění ultrazvukem ^{1,5,9,12}	41
Rotační obrábění ultrazvukem	42
2.3.4 Soustružení, frézování, vrtání ⁵	43
3 Experimentální zařízení pro měření řezných sil	44

3.1	Nepřímé měření řezných sil	44
3.2	Přímé měření řezných sil.....	44
3.2.1	Mechanické dynamometry	45
3.2.2	Elektrické dynamometry ^{21,22}	46
3.2.3	Pneumatické dynamometry ^{21,22}	47
3.2.4	Hydraulické dynamometry	48
4	Vyhodnocení zkoušek broušení keramických materiálů.....	49
4.1	Vlastnosti obráběné keramiky	49
4.2	Metodika zkoušek	49
4.3	Vyhodnocení zkoušek.....	50
4.3.1	Řezné síly.....	50
4.3.2	Drsnost povrchu obrobené plochy	57
5	Technicko-ekonomické hodnocení	60
	Závěr	61
	Seznam použitých zdrojů	62
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	64
	Seznam příloh	65

ÚVOD

Keramika představuje zvláštní skupinu nekovových konstrukčních materiálů, vyznačujících se specifickými vlastnostmi od většiny kovových slitin. Odlišují se především vnitřní stavbou. Jde o látky krystalické s amorní skelnou fází, vzniklou roztavením taviv a sklo tvořících látek.

Pravděpodobně vůbec první keramický nástroj používal člověk již v době kamenné a i mnohem později byly bloky pískovce, obsahující velké množství mikroskopických břitů SiO_2 , používány pro ostření nožů, břitů, nůžek a dalších nástrojů. Pískovcové kotouče se tak na dobu mnoha století staly hlavním brousícím materiálem. Až v nedávné minulosti začali být nahrazovány modernějšími materiály, jako je Al_2O_3 , SiC nebo diamant.

Keramika byla používána jako technický materiál po celá staletí, ale teprve v současné době je používána jako konstrukční materiál. Dřívější využití keramiky ve strojírenství bylo motivováno převážně jejím vysokým bodem tání, chemickou odolností, žáruvzdorností, tepelnými a elektrickými izolačními vlastnostmi. Z mechanických vlastností se využívala dobrá odolnost proti opotřebení a někdy i dobrá pevnost v tlaku.

Použití keramiky je v současné době široké a rozmanité. Používají se při stavbě strojů a různých zařízení. Jedno z důležitých využití je v oblasti vysoko-teplotních aplikací jako jsou systémy konverze energie, díly plynových turbín, spalovací motory, kde zvyšují výkonnost těchto zařízení, jejich spolehlivosti a také snížení hmotnosti. Je to především v elektronice a v neposlední řadě i ve strojírenství.

1 CHARAKTERISTIKA KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

1.1 Všeobecná charakteristika keramiky^{5,6,11}

Keramika je anorganický nekovový materiál s heterogenní strukturou, tvořenou krystalickými látkami o různém složení a uspořádání, které obsahují obvykle větší či menší množství pórů.

Konstrukční keramické materiály se liší od tradiční keramiky především chemickou a fyzikální homogenností, vlastnostmi a typem vazby. Jde o látky krystalické s amorní skelnou fází, vzniklou roztavením taviv a sklo tvořících látek. Keramické materiály jsou vázány převážně iontovými a kovalentními vazbami, v krystalické struktuře převládají složité mřížky kubické a hexagonální.

Keramické materiály mají většinou dobrou chemickou odolnost, vysokou teplotu tání, malou tepelnou vodivost, vysokou tvrdost a pevnost v tlaku i většinou odolnost vůči creepu za vysokých teplot. Za hlavní nevýhodu se považuje jejich velká křehkost, nesnadná obrobitelnost a velká citlivost na vnitřní defekty. Jedna z důležitých vlastností keramických materiálů je nízká elektrická vodivost, kterou využíváme pro výrobu elektroizolačních materiálů.

Z hlediska magnetických vlastností se chová většina materiálů jako diamagnetické nebo paramagnetické. Výjimku tvoří některé oxidové keramiky, které vykazují feromagnetické vlastnosti.

Keramické materiály používané pro konstrukční aplikace rozdělují na tradiční keramické materiály, progresivní keramické materiály a materiály se skelnou strukturou.⁸

- Tradiční keramika se vyrábí ze surovin nacházejících se v přírodě (z jílu, křemene a živce). Jíl se skládá především z hydratovaných křemičitanů hlinitých s příměsí oxidů (TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O). Jíly usnadňují zpracovatelnost při tvarování, oxid křemičitý funguje jako žáruvzdorná složka tradiční keramiky a draselný živec způsobuje vznik skelné fáze v průběhu vypalování keramické směsi. Pro přípravu tradiční konstrukční keramiky jako je např. elektrotechnický porcelán musí být složky keramické směsi (hlavně jíly) co nejčistší. Po vypálení se vytvoří tzv. bílá keramika, to je keramika složená ze tří hlavních krystalických komponentů, oxidu křemičitého, mulitu a leucitu spojených tuhým roztokem křemičitého skla.

- Progresivní konstrukční keramika se vyrábí z čistých, práškových, uměle připravených sloučenin (oxidy, karbidy a nitridy). K nejznámější progresivní konstrukční keramice patří oxid hlinitý, nitrid křemíku, karbid křemíku a oxid zirkoničitý modifikovaný dalšími žáruvzdornými oxidy. Tyto progresivní keramické materiály jsou pro své vlastnosti (vysoký bod tání, chemická stabilita, vysoká tvrdost a pevnost) používány jako důležité konstrukční materiály v oblasti špičkových technologií.

- Skelné materiály mají specifické vlastnosti, kterými se odlišují od ostatních konstrukčních materiálů. Hlavní vlastností je průhlednost a tvrdost. Mají vynikající korozní odolnost v běžném prostředí, které činí ze skel nepostradatelné

materiály pro konstrukční aplikace v laboratořích, elektrotechnickém a chemickém průmyslu.

1.2 Struktura keramických materiálů, silikátů a skel^{5,6,8}

Struktura keramického materiálu závisí na typu vazeb mezi atomy uvnitř materiálů. V keramických materiálech jsou atomy spojeny dohromady kovalentními nebo iontovými vazbami nebo kombinací těchto obou typů vazeb. V kovalentních vazbách jsou elektrony sdíleny pouze dvěma sousedními atomy a výsledkem je směrová vazba. Typické vlastnosti keramiky s kovalentní vazbou je vysoká tvrdost, nízká teplotní roztažnost, vynikající chemická odolnost, zanedbatelná tvárnost a značná elektronová vodivost. Iontová vazba vzniká přenosem jednoho nebo více elektronů mezi sousedními atomy za vzniku nabitých iontů, které jsou přitahovány. Iontové keramiky mají tendenci tvořit těsně uspořádanou strukturu (jako u struktury čistých kovů). Od kovů se odlišují tím, že nemají volné elektrony a atomy mají různou velikost. Z tohoto důvodu mají iontové keramiky vysokou tepelnou roztažnost, nízkou elektronovou vodivost a nízkou tvárnost.

Většina keramických látek má vazbu mezi atomy iontově-kovalentní charakteru. Zastoupení iontového nebo kovalentního charakteru, který závisí na rozdílu elektronegativit atomů a tvořící vazbu a určuje typ krystalové struktury keramické látky. Atomová elektronegativita je schopnost vázaného atomu přitahovat vazebný elektronový pár. Iontový a kovalentní charakter vazby v jednoduchých keramických látkách značně liší, Al_2O_3 (MgO) má výrazný iontový charakter oproti Si_3N_4 který má kovalentní vazbu. – viz. tabulka 1.1.

Tab.1.1 Iontový a kovalentní charakter vazby v některých keramických látkách⁸

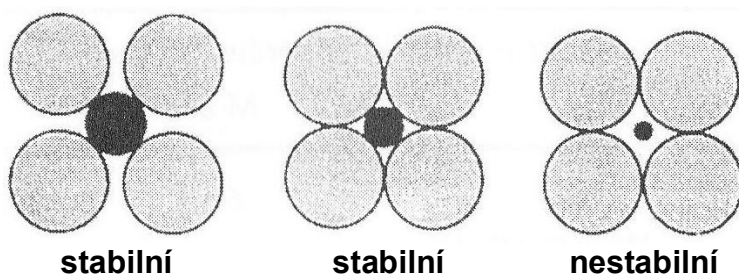
Keramická látka	Vazba	Rozdíl elektonegativit	Iontový charakter [%]	Kovalentní charakter [%]
MgO	Mg - O	2,3	77	23
Al_2O_3	Al - O	2,0	63	37
SiO_2	Si - O	1,7	51	49
Si_3N_4	Si - N	1,2	30	70

1.2.1 Struktura krystalických keramických látek^{6,8,11}

V iontové keramické látce je uspořádání kationtů a aniontů určeno především dvěma faktory:⁸

- relativní velikostí iontů v iontové látce (předpokládá se, že ionty jsou tuhé koule definovaného průměru),
- nutností elektrostatické rovnováhy nábojů (aby byla iontová látka elektroneutralní).

Aby se dosáhlo co nejnižší celkové energie látky, musí být uspořádání iontů v látce co nejtěsnější. Látka bude stabilní, jsou-li anionty v kontaktu s centrálním kationtem a současně je dosažena nábojová neutralita.

Obr. 1.1 Uspořádání aniontů kolem centrálního kationtu⁸

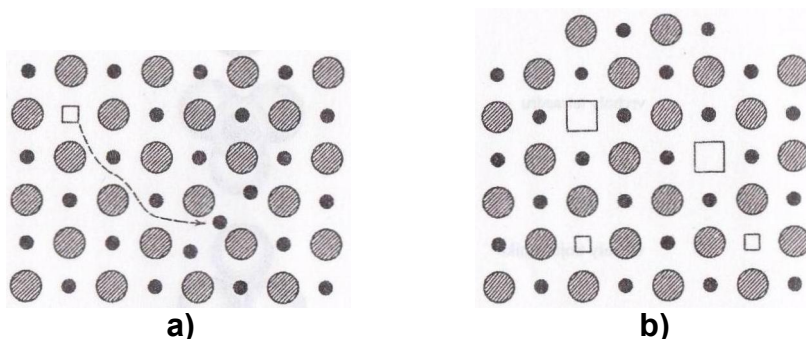
Na obrázek 1.1 je zobrazena stabilní a nestabilní konfiguraci aniontů kolem centrálního kationtu v tuhé iontové látce. Jestliže se anionty nedotýkají centrálního kationtu, struktura se stává nestabilní, protože centrální kationt může volně pohybovat.

Tab.1.2 Jednoduché iontové struktury nejznámějších progresivních konstrukčních keramických materiálů⁸

Keramický materiál	Uspořádání aniontů	Koordinační	Název struktury
		číslo M a O	
MgO, CaO, NiO, CoO	kubické těsné uspořádání	6 : 6	Kamenná sůl (NaCl)
ZrO ₂ , CeO ₂ , HfO ₂	kubické jednoduché	8 : 4	Fluorit (CaF ₂)
SiO, ZnO	hexagonální, těsné uspořádání	4 : 4	Wurtzit (ZnS)
Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₄ , Cr ₂ O ₃	Hexagonální, těsné uspořádání	6 : 4	Korund (Al ₂ O ₃)

V tabulce 1.2 jsou uvedeny iontové struktury progresivních konstrukčních keramických materiálů a z ní je patrné, že většina progresivních keramických materiálů má kubickou nebo hexagonální strukturu v těsném uspořádání aniontů.

I přes těsné uspořádání iontů však v krystalové mřížce existují prázdné prostory. Do těchto prostorů, nazývaných intersticiální místa, mohou vstoupit atomy nebo ionty odlišné od mateřské mřížky. Také ionty ideální krystalové mřížky mohou být nahrazeny jinými ionty, kationty nebo anionty podobného iontového poloměru. Obě varianty vedou k bodovým poruchám krystalové mřížky.

Obr. 1.2 Bodové poruchy iontové krystalické mřížky⁸

Na obrázku 1.2 jsou znázorněny bodové poruchy iontové krystalické mřížky.

- a) iont může obsadit intersticiální místo (Frenkelova porucha)
- b) cizí iont může nahradit původní ion v mřížce (Schottkyho porucha)

Defekty v keramických materiálech významně ovlivňují technologické vlastnosti keramických materiálů, zejména jejich chování při slinování, materiálové vlastnosti, jako je tepelná a elektrická vodivost, optické a chemické vlastnosti.

1.2.2 Struktura silikátů^{6,8}

Silikáty jsou tradiční konstrukční keramické materiály významné pro svou nízkou cenu a dostupnost surovin. Hlavní význam mají silikátové struktury v materiálech jako je cement, cihly, porcelán a sklo. Mnoho důležitých elektrických izolačních materiálů a tepelně izolačních materiálů se také vyrábí ze silikátů.

1.2.3 Skelné materiály^{5,6,8}

Skla mohou být definována jako anorganické produkty tavení, které po ochlazení tuhnou bez krystalizace. Charakteristickou vlastností skel je tedy nekystalická neboli amorfnní struktura. Molekuly ve skle nejsou uspořádány v pravidelném opakujícím se pořádku na dlouhou vzdálenost, jako je tomu u krystalických látek. Ve sklech molekuly mění svou orientaci náhodně v celé struktuře materiálu. Většina anorganických skel je založena na sklotvorném oxidu křemičitém SiO_2 .

1.3 Vlastnosti keramických materiálů

Na vlastnosti keramiky má vliv nejen chemické složení (podíl příměsí nebo naopak přísad), ale i způsob zpracování a odpovídající mikrostruktura.

Charakteristické vlastnosti keramických materiálů: ^{8,11,13}
(+ přednosti, - omezení)

- + vysoký bod tání,
- + vysoká tuhost,
- + dobré dielektrické vlastnosti,
- + vysoká pevnost při vysokých teplotách (1000°C i více),
- + vysoká pevnost v tlaku,
- + vysoká tvrdost,
- + otěruvzdornost,
- + chemická odolnost,
- + korozivzdornost,
- + odolnost proti mechanickému namáhání (zejména tlakem),
- + nízká hustota,
- + nízká tepelná vodivost,
- + polovodičové vlastnosti,
- + dostupné a hojné suroviny,
- + velká pevnost za horka,
- + iontová vodivost,

- + magnetické vlastnosti.
- křehkost,
- citlivost k tepelným rázům,
- nízká reprodukovatelnost,
- obtížná výroba.

1.3.1 Elastické charakteristiky^{5,11}

Při malém krátkodobém zatížení za normální teploty se keramika chová jako pružné látky. Poměrné deformace jsou přímo úměrné napětí (Hookův zákon). Působením normálních napětí dochází k prodloužení nebo zkracování původních rozměr

Vzorce pro poměrné prodloužení nebo zkrácení:¹¹

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]/E \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]/E \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]/E \quad (1.3)$$

ε poměrné prodloužení [-]

σ napětí (index označuje příslušný směr) [MPa],

μ Poissonovo číslo (součinitel příčné kontrakce) [-]

E modul pružnosti v tahu [GPa]

Modul pružnosti v tahu E u většiny keramických látek se pohybuje mezi 70 GPa (porcelán) a 48 GPa (žárově lisovaný SiC). Existují materiály s ještě vyššími hodnotami (slinuté karbidy, TiC), tak i s hodnotami nižšími (porézní keramika pro tepelné izolace). S rostoucí teplotou modul pružnosti v tahu mírně klesá. Poissonovo číslo μ nabývá hodnot 0,17 až 0,36, ale většinou se pohybuje okolo 0,25. Na výsledný modul pružnosti má vliv nejen chemické složení, ale zejména mikrostruktura (typy, podíly a vzájemné uspořádání jednotlivých fází nacházejících se ve struktuře). Závislost modulu pružnosti dvoufázového systému, kde jednu fázi tvoří póry, můžeme určit vztahem:

Závislost modulu pružnosti na objemu pórovitosti:¹¹

$$E = E_0 (1 - aV_p + bV_p^2) \quad (1.4)$$

E modul pružnosti hutného materiálu (bez pórů),

V_p objemový podíl pórů,

a, b konstanty, které závisí na tvaru pórů

Pro kulové uzavření póry rozptýlené v homogenní matici o Poissonově čísle $\mu=0,3$ vyhovují až do $V_P=0,5$ velmi dobře tyto hodnoty $a=1,9$, $b=0,9$.

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že při objemu podílu pórů $V_P=0,5$ by modul pružnosti klesl zhruba na jednu čtvrtinu, což svědčí o výrazném vlivu pórovitosti na snížení modulu pružnosti.

1.3.2 *Plastické charakteristiky* ^{5,6,8,11}

Nejčastěji zjišťovanou veličinou, charakterizující nepružné chování (plasticitu) keramiky za normálních nebo i za zvýšených teplot je tvrdost. U výrobků vystavených dlouhodobému zatížení za vysokých teplot je důležitá rychlost nevratného deformování (pomalé tečení) v závislosti na zatížení a teplotě. U keramiky k jejímu charakterizování zjišťujeme různé parametry creepu.

➤ Trvalá deformace

Za vysokých teplot a v některých případech i za studena se u keramiky projevují odchylky od čistě elastického chování.

Za studena se keramika chová jako tvrdý a křehký materiál. K trvalým změnám tvaru může dojít pouze v mikroobjemech při značně koncentrovaném zatížení. Deformace jednotlivého krystalu vzniká především vzájemným skluzem jeho částí, vyvolaným účinkem smykového napětí. Skluz v reálných krystalech neprobíhá jako posunování celých rovin najednou, ale jako postupné přesmykování za pomoci čárových poruch (dislokací).

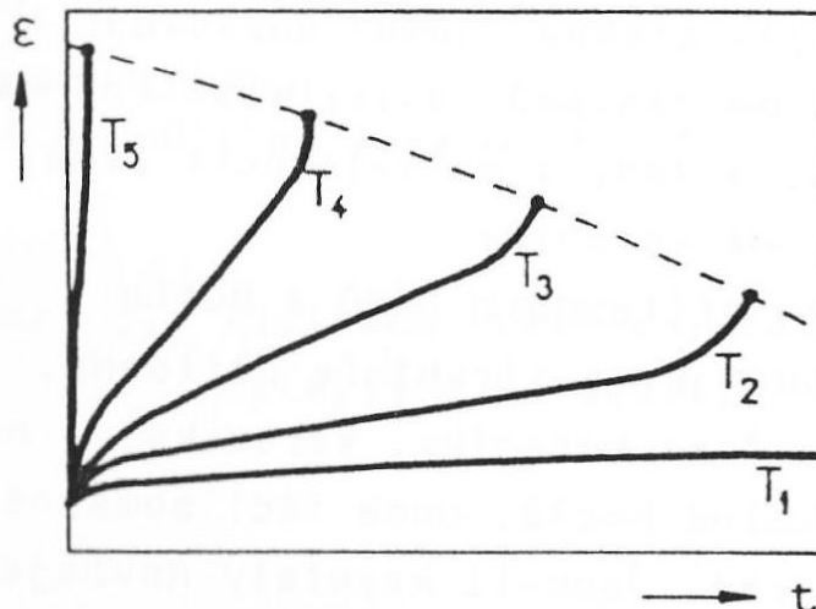
Velikost napětí potřebných pro vyvolání deformací obecně roste se silou meziatomových vazeb. Tato síla je u keramických látek velmi velká a důsledkem jsou vysoké hodnoty modulu pružnosti. U plastických deformací, je rozhodující pohyblivost a manévrovatelnost dislokací. Za pohyblivost dislokace rozumíme jejich snadné přemísťování ve skluzové rovině, manévrovatelností dislokace rozumíme možnost rozvíjení plastických deformací ve složitějších podmínkách (při deformování polykrystalických látek).

➤ Creep

Ve velmi vysoké míře se keramické materiály používají i za velmi vysokých teplot (1000°C a více). V těchto případech jsou projevy nevratného deformování při zatížení zřetelnější. Podobně jako u kovů dochází u keramik při dlouhodobém zatížení k pomalému tečení – tzv. creepu. Creep u keramik probíhá zřetelně až za teplot vyšších než 1000°C a jeho rychlost je funkcí teploty, zatížení a okolního prostředí.

Na obrázku 1.3 jsou znázorněny křivky odpovídající průběhu deformací při konstantním zatížení za různých teplot. Po počátečním okamžitým pružným prodloužením následuje úsek, kdy se rychlost deformování postupně zmenšuje. Potom následuje oblast ustáleného deformování konstantní rychlostí. Po určité době dochází v závislosti na teplotě a zatížení k třetímu úseku, kde se rychlost tečení zvolna zvětšuje vlivem zeslabování nosného průřezu a tvor-

bou četných dutin v materiálu. Následkem vzniku četných dutin v materiálu a dalšími procesy začínajícího rozrušení, jímž celý proces končí. Rychlost nevratného deformování při creepu závisí výrazně na působení napětí a teplotě.



Obr. 1.3 Soubor křivek tečení keramiky za konstantního napětí a při různých teplotách¹¹

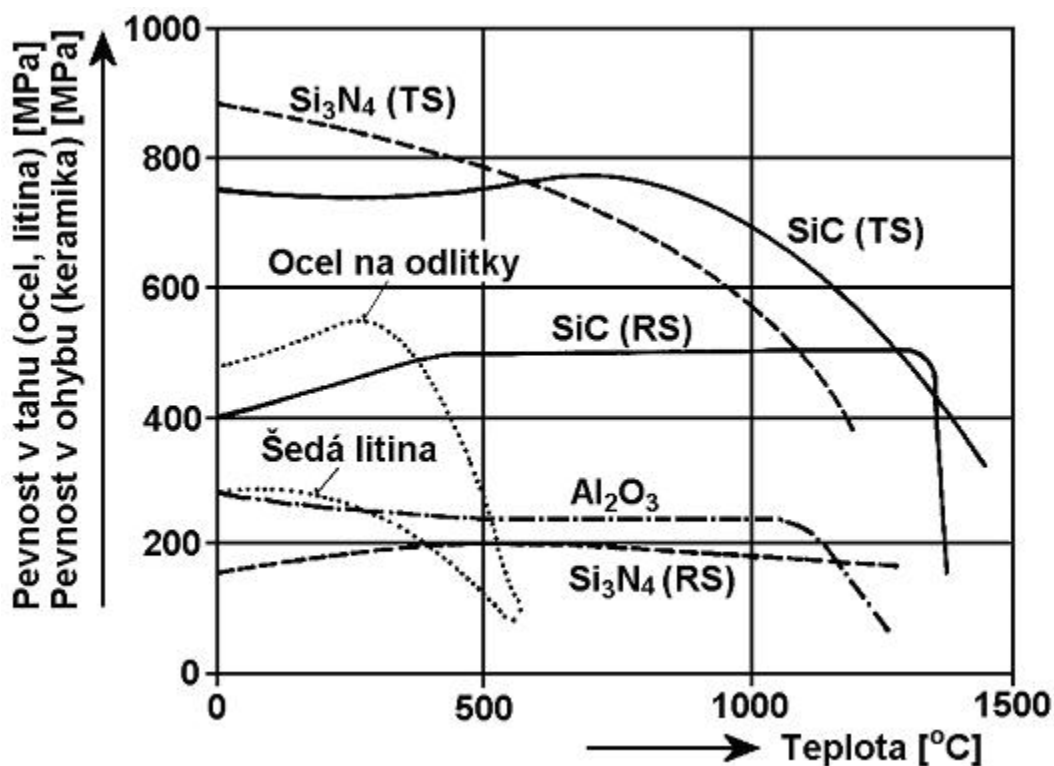
ϵ trvalé prodloužení [-],
 t čas [s],
 $T_1 - T_5$... rostoucí teplota [$^{\circ}\text{C}$]

Creep keramických materiálů je usnadňován přítomností pórů a dutin. Výrazně se také uplatňuje měknutí skelné fáze, když je ve struktuře přítomna. Proto má velký vliv složení, ale i na mikrostrukturu keramiky. Keramika, která obsahuje tvrdší krystalické částice ve skelné hmotě, bude téci poměrně snadno. Důvodem je složení a viskozita skelné fáze. Jestliže jsou krystaly navzájem pevně propojeny (tvoří síť), kterou sklo pouze vyplňuje, tak bude výsledná tuhost vyšší a rychlost creepu menší. Podobně jako skelná fáze se díky minimálnímu stupni uspořádání chovají i v oblasti hranice zrn. Jemnozrnná keramika s relativně velkým podílem hranic zrn bude mít z tohoto důvodu odolnost vůči deformování za vysokých teplot nižší než keramika se zrny většími. Tuto odolnost také snižují póry, jež umožňují volnou deformaci zrn s nimi sousedících.

1.3.3 Pevnost keramiky^{5,6,16}

Pevnost keramických materiálů se pohybuje ve značně širokém rozmezí. Nejmenších hodnot pevnosti v tahu (pod 10 MPa) dosahují různé tepelně izolační materiály, které pevnost v tlaku mají zhruba o řád vyšší. U klasické keramiky na bázi silikátů se v závislosti na složení a přípravě pohybuje pevnost od 30 do 150 MPa. Oxidová keramika má pevnost v ohybu zpravidla 100 až 300 MPa a u čistého slinutého korundu o velikosti zrn 1 až 2 μm byla naměřena pevnost v ohybu za studena 600 MPa. Karbidy a nitridy dosahují ještě větší

pevnosti (tlakově slinovaný Si_3N_4 i SiC) až přes 800 MPa. Nejvyšších pevností se podařilo dosáhnout u speciálních keramických materiálů, využívajících fázových transformací ZrO_2 , které nabývají hodnot přes 1000 MPa.



Obr. 1.4 Závislost pevnosti v ohybu na teplotě a technologii⁵

Legenda: *Pevnost v ohybu:*
 TS – tlakově slinováno, RS – reakčně slinováno
 Si_3N_4 a SiC , slinutý Al_2O_3
Pevnost v tahu:
 Ocel na odlitky a šedá litina

Pevnost v ohybu závisí na velikosti povrchových trhlin. S teplotou klesá, z počátku pomalu, ale za vysokých teplot rychleji. Keramika má za studena obvykle nižší pevnost než kovy, zachovává si ji až do značně vysokých teplot, kdy u kovů dochází k prudkému poklesu pevnosti.

Pevnost v tahu závisí na velikosti trhlin a na materiálových vlastnostech určující odpor materiálu proti šíření trhlin (u křehkých materiálů je obtížně reprodukovatelná)

Pevnost v tlaku je poměrně vysoká a lépe reprodukovatelná, protože povrchové trhliny mají na ni menší vliv.

Snižování pevnosti keramiky je způsobeno: ⁴

- strukturními defekty atomárních rozměrů
- povrchovými vadami a mikrotrhlinkami

- trhlkami a vadami zniklé technologickým postupem
- vadami a koncentrátory napětí

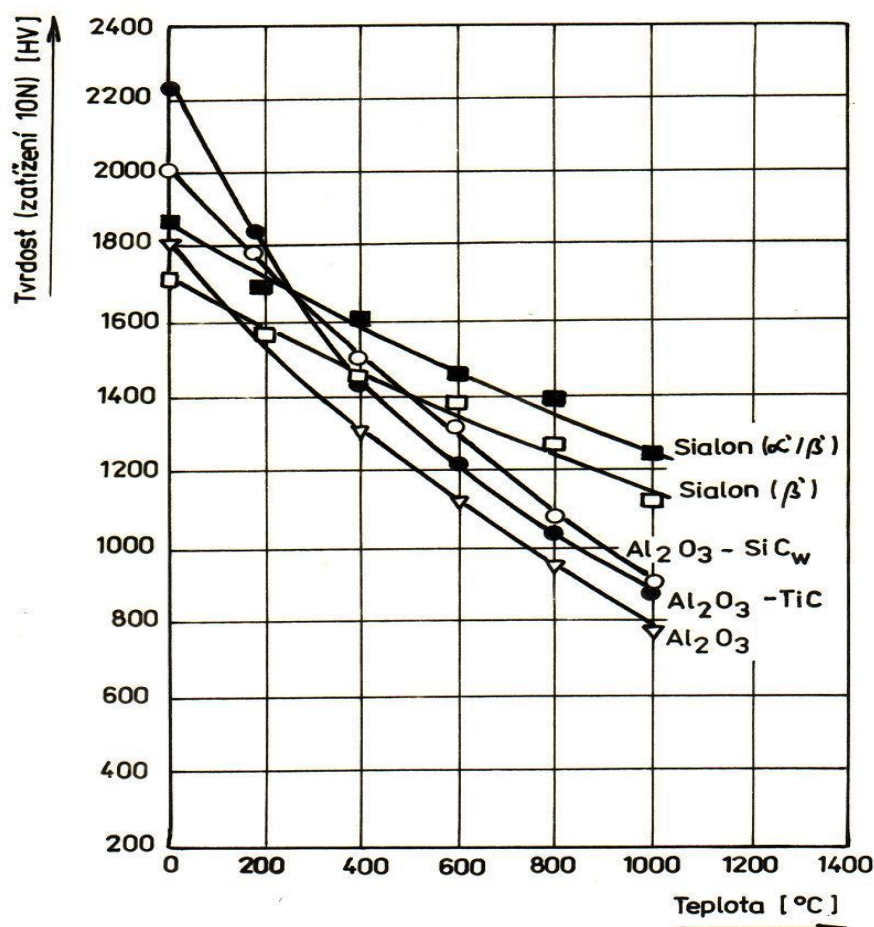
1.3.4 Tvrdost keramiky^{4,5,6,11}

Tvrdost keramických materiálů je velmi vysoká. Podle Mohsovy stupnice vrypové tvrdosti, keramika zaujímá místo mezi nejtvrdšími materiály:¹¹

- silikátová keramika - stupeň 5 až 7
- oxidová keramika - stupeň 8 až 9
- neoxidová keramika - stupeň 9 až 9,5

Po diamantu, jehož tvrdost je charakterizována stupněm 10, patří některé z keramických látek mezi nejtvrdší materiály vůbec.

Tvrdost je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost v případě keramiky nelze jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, protože více než jiná mechanická vlastnost závisí na zkušebních podmínkách. Z hlediska měření tvrdosti spočívá největší rozdíl mezi kovem a keramikou v tom, že plastická deformace keramiky je velmi nízká a energie přivedená do materiálu při zkoušce tvrdosti se uvolňuje vznikem trhlin různého typu.



Obr. 1.5 Závislost tvrdosti při zatížení na teplotě¹⁹

Důvodem vysoké tvrdosti keramických materiálů je nízká hustota a nízká pohyblivost dislokací (na rozdíl od kovů neexistuje u keramiky závislost mezi tvrdostí a pevností).

1.3.5 Lomová houževnatost keramiky^{5,6,8}

Keramické materiály vzhledem k jejich iontově kovalentním vazbám mají nízkou lomovou houževnatost, definovanou jako odolnost materiálu vůči růstu trhlin. Typickým lomem v keramice je lom křehký (štěpný lom nestabilní).

Lomové chování keramických materiálu se dělí na:

- zcela křehké – nejsou schopny plastické deformace (Al_2O_3 , SiO_2 , Si_3N_4 , SiC , TiC)
- polokřehké – jsou schopny omezené plastické deformace (keramika s dobrou pohyblivostí, ale špatnou manévrovatelností dislokací – MgO , ZrO_2)
- houževnaté – do této skupiny nelze zatím zařadit žádný praktický keramický materiál

Klasická rázová zkouška není vhodná pro keramiky, proto vyjadřujeme křehkost keramiky hodnotou lomové houževnatosti K_{IC} . Lom u keramických materiálů nastane v okamžiku, kdy lomová houževnatost K_{IC} dosáhne vlivem zvětšení trhliny své kritické hodnoty při určitém zatížení.

1.3.6 Únavové porušení keramických materiálů⁸

Únavové porušení kovů nastává při opakovaném cyklickém zatížení a při růstu trhlin v napětově namáhaném materiálu. Vzhledem k iontově-kovalentním vazbám v keramickém materiálu, nedochází při cyklickém namáhání k plastické deformaci keramiky. Únavové porušení keramiky je proto vzácné.

Přesto byly pozorovány únavové efekty i při pokojové teplotě, spojené s růstem trhlin. Zjistilo se, růst trhlin nastává podél hranic zrn a vede nakonec k únavovému porušení na hranicích zrn.

1.4 Výroba keramických materiálů

Výroba keramiky je založena na vytvarování a tepelném zpracování práškových látek, které se žářem zpevní a zhutní. Vznikne polykrystalický produkt, jehož fázové složení se může vlivem vysokoteplotních reakcí lišit od výchozí směsi. Krystalickými fázemi u klasické keramiky jsou často minerály známé v přírodě, které se vyznačují pevností, chemickou odolností a stálostí za zvýšených teplot.

Většina tradičních a progresivních keramik se vyrábí slinováním keramických práškových surovin. Základní kroky při výrobě keramiky jsou:

- příprava keramických surovin (práškové směsi) k tvarování,
 - mletím
 - mícháním
- sušení,
- tvarování,
- tepelné zpracování (zhutňování, slinování)
- úpravy povrchu,

1.4.1 Příprava práškové směsi^{11,13}

Na výrobní proces i na vlastnosti produktu má vliv chemické a minerálové složení surovin, velikost částic a stav jejich povrchu. Všechny tyto veličiny mohou být proměnné v širokém rozmezí. Pro získání požadovaných vlastností je nutné dát mimořádnou péči přípravě práškové směsi před tvarováním.

Komerčně využívané metody výroby prášků zahrnují metody chemické, elektrolytické, mechanické, plazmového tavení a atomizace. V případě keramických prášků se převážně aplikují chemické postupy, zajišťující řízenou nukleaci i vlastní růst částic z roztoku nebo plynné fáze.

Podle potřeby můžeme prášek upravit mletím, míšením, sušením a tříděním.

1.4.2 Sušení¹¹

Sušením se snižuje obsah kapalného pojiva. Pevné částice prášku se k sobě přibližují, stýkají se v bodech nebo plochách a hmota jako celek se smršťuje. Smršťování probíhá až do doby, kdy se částice navzájem dotknou. Od tohoto okamžiku rychlost sušení klesá. Jak se částice přiblíží na dotek, tak podstatná část smršťování je skončeno.

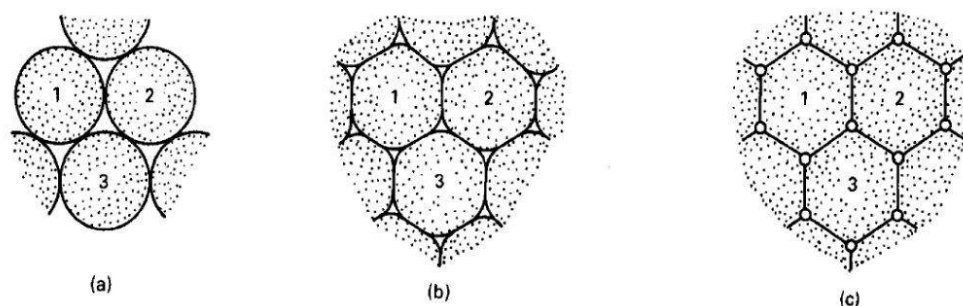
Nesprávný postup sušení vede k vážným poruchám. Když neprobíhá odstraňování vlhkosti a smršťování rovnoměrně v celé hmotě, vznikají tahová napětí v sušší zóně a při překročení meze pevnosti způsobí vznik trhlin.

1.4.3 Tvarování^{8,11,13}

Před vlastním vytvářením, kdy se z prášku připravuje základní tvar výrobku, se do suroviny přidávají další chemické látky. Tyto látky se nazývají přísady. Důležité přísady jsou: vazební (usnadňují manipulaci s polotovarem), lubrikační (snižující tření mezi částicemi samotnými i mezi částicemi a formou), slinovací (ovlivňují a zlepšují difúzi) a plastifikátory (zajišťující dokonalé vyplnění tvaru).

▪ Slinování^{8,13}

Slinování je druh tepelného zpracování, při kterém se prášek ve výlisku zhutní jako důsledek souhrnu převážně fyzikálních procesů, aby výlisek získal požadované složení. Prášek má oproti masivnímu tělesu podstatně větší měrný povrch a tím i vyšší povrchovou energii. Přebytek této energie je hnací silou při slinování, protože se výlisek snaží snížit povrchovou energii. Čím jsou součástky menší, tím je specifický povrch větší a proces rychleji probíhá. Mechanismus tohoto procesu je difuze atomů. Difuze se uvede do pohybu dodáním aktivační energie v podobě tepla a začíná na styčných plochách zrn prášku jako difuze povrchová a na hranicích zrn. Při vyšší teplotě se přidružuje difuze v objemu. Výsledkem atomárního transportu je zhutňování výlisku a ubývání pórovitosti. Na obrázku 1.7 je znázorněn proces slinování.



Obr. 1.7 Slinování keramického materiálu⁹

a) výchozí stav, b) vznik zárodků a jejich růst, c) struktura slinutého vzorku

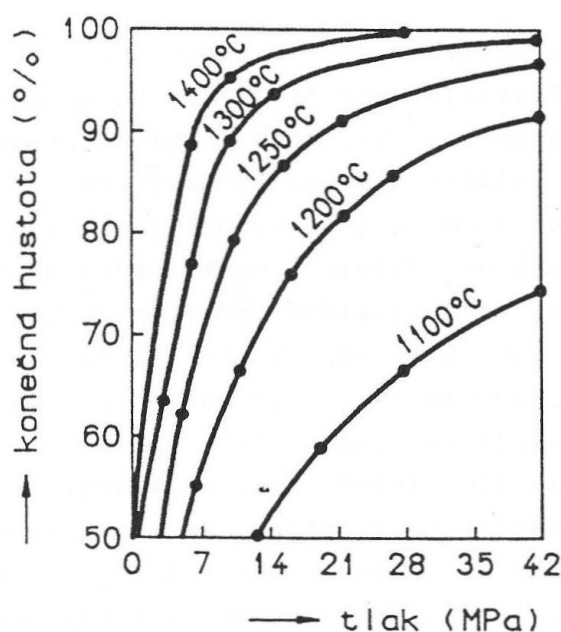
V praxi se vypalovací teploty pohybují nejčastěji mezi 1000 až 1400 °C, což lze dosáhnout poměrně snadno běžnými plynnými palivy a také konstrukce pecí pro tyto teploty vystačí s běžnými materiály.

▪ Žárové lisování (Hot pressing) – HP¹¹

Významnou metodou k urychlení slinování a dosažení vysokých konečných hustot je tzv. tlakové lisování (žárové lisování), kdy látky slinují pod vnějším tlakem, který umožňuje plastickou deformaci částic. Probíhá přeskupováním zrn skluzem po rozhraních a difuzí z míst vystavených tlaku do míst s tahovým napětím.

Tento způsob se používá u oxidové, karbidové a nitridové keramiky. Teploty při tlakovém slinování jsou o několik set stupňů nižší než při slinování za normálního tlaku.

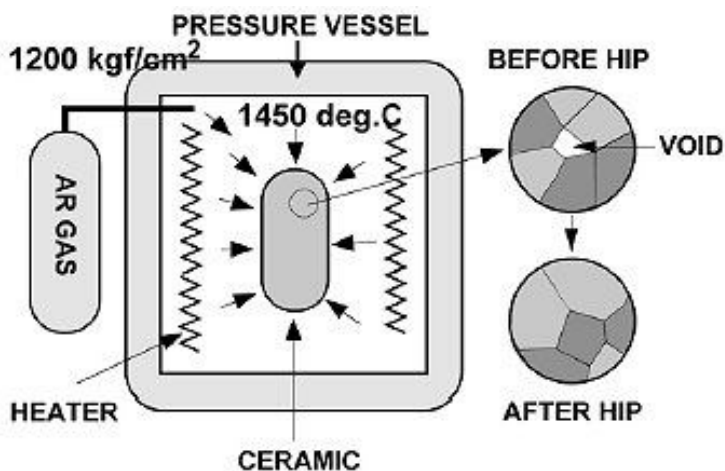
Lisovací tlaky jsou 40 až 60 MPa. Vliv tlaku a teploty na slinování Al_2O_3 pod tlakem je znázorněn na obrázku 1.8.

Obr. 1.8 Vliv tlaku a teploty na slinování Al_2O_3 ¹¹

▪ **Žárové izostatické lisování (Hot isostatic pressing) – HIP**^{8,11}

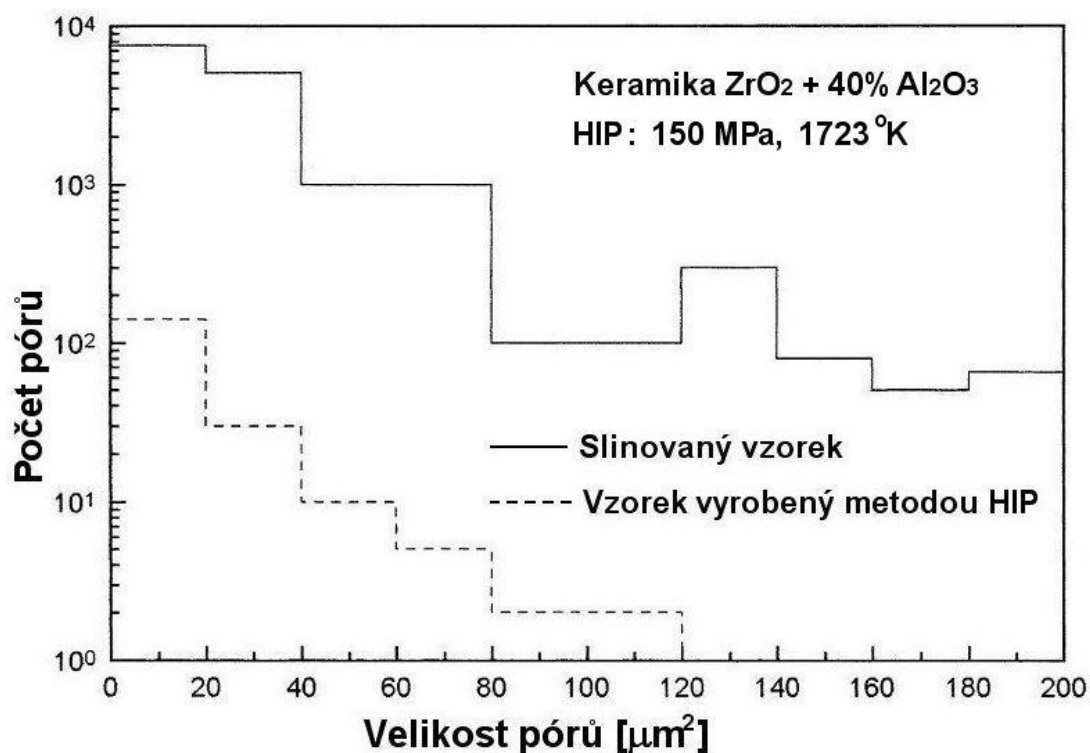
Při žárovém izostatickém lisování za tepla působí tlak plynu (argon, helium) na těleso rovnoměrně ze všech stran. Současně s atmosférou plynu může probíhat ohřev tělesa. Tělesem je patrona naplněná práškem. Sytká hmotnost prášku musí být nejméně 60 % teoretické specifikace hmotnosti kompaktního materiálu. Toho můžeme dosáhnout pouze tehdy, když prášek má kulovitý tvar.

Žárové izostatické lisování se provádí pod tlaky 100 až 200 MPa a při teplotách 2 000 °C. Proces trvá 2 až 6 hodin. Patrony, které odpovídají tvaru konečného výrobku jsou vyrobeny z plechu (po hipování se odstraní) nebo z keramiky (metoda vytavitelného modelu). Schéma zařízení je znázorněno na obrázku 1.9.

Obr. 1.9 Schéma zařízení metody HIP¹⁶

Výhody žárového izostatického lisování - HIP:

- přesnost výroby,
- úspora materiálu,
- odstranění pórovitosti,
- umožňuje zhotovit vylisky ze složitého tvaru,
- zvýšení odolnosti proti houževnatosti,
- lze vyrábět kompozitní součásti,



Obr. 1.10 Velikost a počet dutin a pórů v keramice¹⁹

V tab. 1.3 je znázorněn vliv metody HIP na mechanické vlastnosti některých keramických látek.

Tab.1.3 Vliv HIP na mechanické vlastnosti keramik¹⁹

Vlastnost	Al_2O_3		ZrO_2		Si_2N_3	
	Před HIP	Po HIP	Před HIP	Po HIP	Před HIP	Po HIP
Relativní hustota [%]	97,5	99,8	99,7	99,7	95,7	99,7
Tvrdost [HRA]	93,0	93,7	90,0	91,0	92,5	93,5
Ohybová pevnost [MPa]	490	735	980	1568	980	1176
Lomová houževnatost [$MPa \cdot m^{1/2}$]	3,0	3,5	7,5	8,0	7,0	7,5

▪ **Reakční slinování – RS** ^{11,13}

Metoda využívá poznatku, že pevné látky jsou snáze neformovatelné v intervalu teplot. Chemickou cestou se aktivizuje proces spékání. Probíhají chemické reakce, které produkují nové fáze, které krystalizují v pórech nebo na konkrétních plochách částic a zintenzivňují vlastní zhutňování. Slinování za současné reakce je typické pro výrobu neoxidové keramiky některých karbidů (SiC) a nitridů (Si₃N₄) při teplotách 1200 až 1600 °C.

1.5 Rozdělení konstrukčních keramických materiálů

Pro dělení a značení keramických konstrukčních materiálů neexistuje konkrétní norma. Z hlediska zaměření na techniku pro konstrukční účely se držíme dělení podle chemického složení, které rozlišuje tři skupin: ^{4,19}

➤ **Oxidová keramika**

- čistá obsahuje 99% Al₂O₃
- polosměsná Al₂O₃+ZrO₂,
Al₂O₃+ZrO₂+CoO
- směsná Al₂O₃+TiC
Al₂O₃+TiN
Al₂O₃+ZrO₂+TiC
Al₂O₃+TiC+TiN

➤ **Neoxidová (nitridová) keramika**

Představují chemické sloučeniny, tvořené lehkými prvky III. až V. skupinami Mendělejevovy tabulky. Obrázek 1.11 ukazuje možné systémy binárních sloučenin, které dané prvky mohou tvořit.

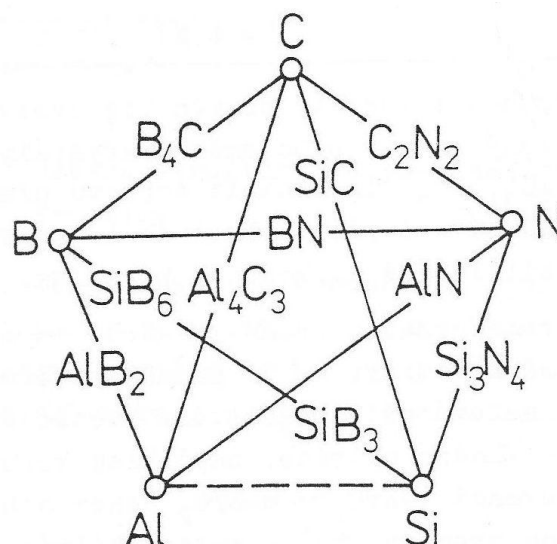
Nejzajímavější z hlediska vlastností i praktických možností jsou karbidy a nitridy boru, křemíku a hliníku (B₄C, BN, SiC, Si₃N₄, AlN). Velmi perspektivní jsou i keramiky sialonového typu (Si-Al-O-N).

Tato oxido-nitrido-hlinito-křemičitá keramika v systému Si₃O₆+Al₄O₆+Si₃N₄+Al₄N₄ představuje rozhraní oxidové a neoxidové keramiky.

Nejdůležitější konstrukční nové (progresivní) keramické materiály můžeme shrnout do pěti základních skupin:⁸

- *keramika na bázi oxidu hlinitého* (který je nejrozšířenější konstrukční keramikou),
- *karbid křemíku* (který je používán především pro svou vysokou tvrdost, dobrou odolnost vůči tečení při vysokých teplotách),

- *nitrid křemíku* (který je vůbec nejslibnější konstrukční keramický materiál pro vysokoteplotní aplikace),
- *sialony – tuhé roztoky soustavy Si-Al-ON* (které představují spojnicí mezi oxidovými a neoxidovými keramikami)
- *oxid zirkoničitý* (jeho největší předností je velmi vysoký bod tání a jedinečná struktura, která umožňuje transformační zhouževnatění).



Obr. 1.11 Systémy, ve kterých mohou existovat nekovové obtížně tavitelné sloučeniny¹³

1.5.1 Keramika na bázi oxidu hlinitého^{8,11}

Tato keramika se především vyrábí z oxidu hlinitého, nejčastěji v α modifikaci. Surovinou pro výrobu oxidu hlinitého je nejčastěji hydratovaný oxid hlinitý v přírodě se nacházející jako bauxit. Nové konstrukční aplikace využívají i čistý oxid hlinitý, tak ve směsi dalšími žáruvzdornými materiály. Mechanické vlastnosti keramických materiálů na bázi oxidů hlinitého jsou uvedeny v tabulce 1.4. Pevnost v ohybu čistého oxidu hlinitého je až 500 MPa a lomová houževnatost dosahuje hodnoty cca 4,5 MPa·m^{1/2}.

Tab.1.4 Mechanické vlastnosti oxidových nových keramických materiálů⁸

Keramický materiál	Hustota [g·cm ⁻³]	Pevnost v ohybu [MPa]	Lomová houževnatost [MPa·m ^{1/2}]	Modul pružnosti [MPa]
Al ₂ O ₃ (obsah 99%)	3,5 ÷ 4,0	150 ÷ 500	3,5 ÷ 4,0	200 ÷ 400
Al ₂ O ₃ / ZrO ₂	4,15	630 ÷ 780	5,0 ÷ 6,0	300
Al ₂ O ₃ / SiC / Al	3,4 ÷ 3,5	450 ÷ 500	7,0 ÷ 7,5	310 ÷ 330
SiC / Al ₂ O ₃	3,6	690	8,0	0,25

- Prvním typem keramických kompozitu na bázi oxidu hlinitého je oxid hlinitý zhouževnatěný oxidem zirkoničitým. V důsledku transformačního zhouževnatění pevnost v ohybu dosahují cca 780 MPa a lomové houževnatosti cca $6,0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Kvůli nižší ceně oxidu hlinitého než oxidu zirkoničitého nachází tyto materiály uplatnění především pro konstrukce pracující za normální teploty.
- Druhým typem materiálu na bázi oxidu hlinitého je oxid hlinitý zhouževnatělý whiskery karbidu křemíku. Když se tento materiál vyrobí lisováním za horka, pevnosti dosáhnou až 690 MPa a lomová houževnatost cca $8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.
- Třetím typem kompozitních materiálů dosahují podobných mechanických vlastností jsou materiály na bázi oxidu hlinitého zpevněného nebo vyztuženého přidáním dalších částic jako je karbid titanu, nitrid křemíku a karbid boru.

Přímou oxidací roztaveného hliníku, obsahujícího částice křemíku, je možné připravit materiály s pevností až 500 MPa a lomovou houževnatostí kolem $7,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

1.5.2 Keramické materiály na bázi karbidu křemíku ^{8,11}

Karbid křemíku má dobrou odolnost vůči oxidaci, protože přítomnosti kyslíku vzniká na jeho povrchu ochranná vrstva oxidu křemičitého. Dobrá odolnost vůči teplotním rázům je způsobena zejména nízkou teplotní roztažností a vysokou vodivostí. Karbid křemíku existuje v kubické formě označovaný jako β -karbid křemíku a několika nekubických, převážně hexagonálních formách. Tyto formy jsou obecně nazývané α -karbid křemíku. Karbid křemíku, který se v přírodě nenachází, se vyrábí procesem podle Achesona. Tato metoda¹¹ je založena na redukci oxidu křemičitého při teplotách kolem 2600 °C. Pro konstrukční aplikace se připravují tři kategorie keramických materiálů na bázi karbidů křemíku (reakčně slinované, žárově lisované horka a slinované).

Karbid křemíku jako kovalentní sloučenina slinuje obtížně. Pro klasické slinování se proto používají přísady jako jsou oxid hlinitý, uhlík a bor. Slinování na vysokou hustotu však probíhá lépe při metodě slinování za horka, kdy teplota dosahuje až 2000 °C. Reakční slinování nepracuje s díly připravenými z práškového karbidu křemíku, ale ze směsi uhlíku a křemíku.

Z tabulky 1.5 je patrné, že mechanické vlastnosti karbidu křemíku, hlavně pevnost v ohybu, závisí na způsobu výroby. Nejvyšší pevnost mají materiály lisované za horka a nejnižší materiály reakčně slinované. Způsob zpracování nemá významný vliv na lomovou houževnatost. Keramické materiály na bázi SiC si podržují své mechanické vlastnosti i při teplotách kolem 1400 °C. Proto jsou používány při vysokoteplotních konstrukčních aplikacích.

Tab.1.5 Mechanické vlastnosti neoxidových nových keramických materiálů⁸

Keramický materiál	Hustota [g·cm ⁻³]	Pevnost v ohybu [MPa]	Lomová houževnatost [MPa·m ^{1/2}]	Modul pružnosti [MPa]
SiC lisovaný za horka	3,2 ÷ 3,3	300 ÷ 800	3,0 ÷ 6,5	430 ÷ 450
SiC slinovaný	3,0 ÷ 3,2	275 ÷ 540	2,5 ÷ 6,5	375 ÷ 420
SiC reakčně slinovaný	2,9 ÷ 3,1	175 ÷ 450	4,0	350 ÷ 375
Si ₃ N ₄ lisovaný za horka	3,07 ÷ 3,37	450 ÷ 1100	2,8 ÷ 6,6	250 ÷ 325
Si ₃ N ₄ slinovaný	2,8 ÷ 3,4	275 ÷ 840	3,0 ÷ 5,6	195 ÷ 315
Si ₃ N ₄ reakčně slinovaný	2,5 ÷ 3,1	50 ÷ 300	3,0 ÷ 4,0	100 ÷ 220

1.5.3 Keramické materiály na bázi nitridu křemíku^{8,11}

Nitrid křemíku je jeden z nejpevnějších konstrukčních keramických materiálů. Je odolný vůči oxidaci v důsledku přítomnosti ochranné vrstvy oxidu křemičitého na povrchu. Má dobrou odolnost proti teplotním rázům z důvodu nízkého koeficientu tepelné roztažnosti. Má vysokou pevnost a relativně nízký modul pružnosti. Materiály na bázi nitridu křemíku rozdělujeme do tří základních kategorií:

- materiály připravený reakčním slinováním,
- materiály slinované za tlaku dusíkové atmosféry,
- materiály připravené nebo žárovým izostatickým lisováním.

Nitrid křemíku se připravuje syntetický, přímou nitridací křemíku. Čistý nitrid křemíku se vyskytuje ve dvou krystalických formách (α a β) a obě mají hexagonální mřížku. Reakčně vázaný nitrid křemíku se připravuje tvarováním čistého křemíkového prášku a reakčním slinováním keramického tělesa v dusíkové atmosféře při vysoké teplotě (kolem 1500 °C).

Další proces přípravy dílů z nitridu křemíku vychází z nitridu křemíku, který se musí slinovat v dusíkové atmosféře minimálně při tlaku 1 atmosféra. Z pravidla se používají přetlaky atmosféry 10 MPa. V případě v podmínkách izostatického lisování za horka při tlaku dusíkové atmosféry cca 200 MPa. Mechanické vlastnosti nitridů křemíku jsou uvedeny v tabulce 1.5. Z ní vyplývá, že pevnost v ohybu závisí na způsobu přípravy. Nejvyšší pevnost mají materiály lisované za horka. Pevnosti nitridu křemíku jsou vyšší než pevnosti karbidu křemíku. Lomová houževnatost materiálu na bázi nitridu je podobná jako u karbidů křemíku. Zvýšení lomové houževnatosti lze dosáhnout přidávkou částic karbidu křemíku do nitridu křemíku a dostaneme lomovou houževnatost až 10 MPa.

1.5.4 Sialony⁸

U keramických materiálů na bázi nitridu křemíku provedeme nahrazení atomu křemíku a dusíku atomy hliníku a kyslíku. V keramice na bázi β -nitridu křemíku vzniká významná skupina keramických materiálů. Tyto materiály mají pevnost kolem 800 MPa a lomovou houževnatost kolem 6 až 7 MPa·m^{1/2}. Sialony si své vlastnosti podržují až do teplot 1300 °C.

1.5.5 Keramika na bázi oxidu zirkoničitého⁸

Keramické materiály na bázi oxidu zirkoničitého si získali užití pro svou velice vysokou pevnost a lomovou houževnatost při normální teplotě.

Pevnosti částečně zhouževnatělého oxidu zirkoničitého dosahují hodnot až 1000 MPa a lomové houževnatosti 9 MPa·m^{1/2}. U polykrystalů tetragonálního oxidu zirkoničitého byly naměřeny pevnosti až 2400 MPa a lomové houževnatosti 20 MPa·m^{1/2}.

1.6 Použití konstrukčních keramických materiálů^{8,13}

Keramika je se svými vynikajícími elektrickými, magnetickými, tepelnými a chemickými vlastnostmi nepostradatelná v průmyslu elektrotechnickém a elektronickém.

Díky mechanickým vlastnostem za vysokých teplot, odolností proti otěru, korozi a dalším termomechanickým vlastnostem se konstrukční keramika uplatňuje ve strojírenství, hutnictví, chemickém a textilním průmyslu.

Nové konstrukční keramické materiály lze rozdělit podle použití do těchto skupin:⁸

- Otěruvzdorné součásti:

Součásti mají vysokou tvrdost, chemickou odolnost, schopnost opracování na jemný povrch s vysokými tolerancemi, houževnatost, pevnost v širokém rozsahu teplot a korozní odolnost. Jako materiál se nejčastěji používá oxid hlinitý, nitrid křemíku, nitrid boru, karbid křemíku, karbid boru.

- Keramické brusné materiály:

Keramické materiály, které mají vysokou tvrdost se přednostně používají jako brusné materiály pro řezání, broušení a leštění. Nejčastěji se používá tavený oxid hlinitý a karbid křemíku. Jako vhodnější brusný materiál je karbid křemíku, protože je tvrdší. Kombinací oxidu zirkoničitého s oxidem hlinitým se zlepšuje brusná schopnost materiálu.

- Řezné nástroje:

Keramické řezné nástroje si při teplotách přes 600 °C zachovávají pevnost a tvrdost. Odolávají vysokoteplotním deformacím a mají delší životnost. Na řezné nástroje se používá keramika na bázi oxidu hlinitého, keramika směsná na bázi oxidu hlinitého a karbidu titanu a keramika na bázi nitridu křemíku.

- **Ložiska:**

Z keramických materiálů se vyrábějí součásti, které jsou odolné vůči únavě, vysoké teplotě, korozi a ztrátě mazných vlastností. Kulové a válečkové ložiska mají vysokou tvrdost a vynikající vysokoteplotní vlastnosti, které se používají při konstrukci motorů s vysokou účinností. Pro tyto účely se používá nitrid křemíku, protože má malý třecí koeficient, vysokou odolnost vůči otěru, vysokou pevnost v tlaku a dlouhou životnost.

- **Keramika pro lékařské aplikace:**

Jsou to dentální nebo ortopedické implantáty, které rozdělujeme do tří skupin. Inertní – hlavně oxid hlinitý a oxid zirkoničitý v transformačně zhouževnatělé formě. Keramika s bioaktivním povrchem se vyrábějí ze sklokeramických materiálů, bioskel a kompozitů. Resorbovatelná keramika se vyrábí z kompozitů polymerů a kalciumfosfátu.

- **Elektrochemická zařízení:**

Keramika musí mít vhodné elektrické vlastnosti i vlastnosti mechanické. Keramika na bázi oxidu zirkoničitého a slouží jako supravodiče, které se používají v palivových článcích, bateriích, senzorech a tepelných strojích.

- **Tepelné stroje:**

Používají se jako součástky turbodmychadel, jako povlaky nebo monolitické komponenty pro vznětové motory. Pro výrobu se používá nitrid a karbid křemíku.

- **Tepelné výměníky:**

Pro výrobu se používá především karbid křemíku, protože má vysokou tepelnou odolnost, vynikající tepelnou vodivost, odolnost proti korozi a dobrou odolnost proti teplotním rázům.

- **Povlaky:**

Povlaky zvyšují tepelnou a chemickou odolnost. Použití je pro ultratvrdé povlaky pro řezné nástroje, tepelné izolace a samomazné povlaky pro vznětové a plynové turbíny.

- **Vojenské a kosmické použití:**

Keramické materiály se využívají pro výrobu vojenských a kosmických zařízení jako jsou raketové trysky a součásti pro spalovací motory. Zde se využívá oxid hlinitý, karbid boru a křemíku nebo borid titanu na pancéřování vojenských strojů (letadel a helikoptér).

2 METODY OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Keramické materiály jsou řazeny do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. Keramické materiály se obrábějí pomocí tzv. dokončovacích a nekonvenčních technologií obrábění.^{1,9,12}

Součásti z oxidových i neoxidových konstrukčních keramických materiálů jsou většinou vyráběny lisováním nebo odléváním. Když přesnost součásti není rozhodující, tak ji můžeme vyrobit v konečném rozměru a tvaru. Součásti, které vyžadují velkou přesnost jsou dále obráběny. Opracování se většinou provádí surovém stavu, ale i ve slinutém stavu. Rozvoj výrobních technik, které produkují keramické součásti, které nevyžadují konečnou úpravu rozměrů a tvarů. Jsou i konstrukční součásti, u kterých požadujeme z důvodu trvanlivosti a spolehlivosti užší tolerance rozměrů a úchylek tvaru a vyšší kvalitu funkčních povrchů jsou zapotřebí účinné obráběcí metody.

Dokončovací metody obrábění (např. broušení a leštění), které mají za účel dosažení dokonalé jakosti obrobené plochy, vysoké přesnosti požadovaného rozměru při dodržení geometrickém tvaru. Těmto požadavkům nelze vyhovět běžnými operacemi obrábění.

Rostoucí rozsah využívání nekonvenčních metod obrábění je vyvolán vývojem a používáním materiálů s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí, materiálů odolných proti opotřebení, které nelze standardními metodami hospodárně obrábět.

Nekonvenční (fyzikální) technologie obrábění jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálů. Jedná se převážně o bez silové působení nástroje na obráběný materiál, bez tvoření klasických třísek, které vznikají při obrábění reznými nástroji.

Nekonvenční metody obrábění jsou charakterizovány:¹

- rychlost, možnosti a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál (zvláště tvrdé materiály se dají obrábět nástroji z měkkých materiálů,
- možnost provádění složitých technologických operací, jako výrobu děr se zakřivenou osou, obrábění děr složitých tvarů, tvarových dutin v materiálech o vysokých mechanických vlastnostech,
- umožňují zavádění plné mechanizace a automatizace a tím včlenění dané operace do výrobní linky
- umožňují zvýšení technologičnosti konstrukce a sériovosti výroby, omezení počtu zmetků a snížení pracnosti dané operace.

Metody, které se využívají pro obrábění keramických materiálů jsou rozdílné, ale využívají k obrábění stejný princip. Vhodným působením v materiálu vyvolat jednu nebo více trhlin, která způsobí oddělení potřebné části materiálu. Nově získaný povrch, který má požadovaný tvar a vlastnosti je tvořen jako je-

diná souvislá lomová plocha nebo jako souhrn mnoha malých lomových plošek.

Rozdělení:^{5,9,15}

- Metody, které se používají k obrábění keramických materiálů:
 - lámání s naříznutím,
 - řezání,
 - soustružení,
 - frézování,
 - vrtání,
 - broušení,
 - leštění,
 - otryskávání,
 - obrábění vodním paprskem,
 - obrábění ultrazvukem,
 - obrábění paprskem laser
- Metody, které jsou obtížně použitelné pro obrábění keramiky:
 - elektroerozivní obrábění,
 - elektrochemické obrábění,
 - chemické obrábění,
 - obrábění plazmatem,

2.1 Obrábění pomocí vytvoření trhliny

Při obrábění řezáním keramických materiálů nám vznikají velmi složité lomové jevy, které se zakládají na vzniku a šíření trhlin a na drobení odřezávaného materiálu. Pod čelem nože vznikají trhliny, které pronikají do větších hloubek, než je hloubka odebíraného materiálu. Zde vznikají hluboké lomové krátery. Povrch je drsný a hrubý a způsobuje neurčitost rozměrů. Trhlinu, která je schopna dalšího růstu v keramice nebo ve skle můžeme vyvolat intenzivním silovým působením nebo intenzivním energetickým působením.

2.1.1 Vyvolání trhliny mechanickým způsobem^{5,11}

Trhlinu většinou vytváříme tím, že do materiálu vtláčujeme při odvalování vhodné tělísko o tvaru hrotu nebo klínu. Používáme brusné zrna, řezací diamant, kolečko a sekací nůž. Tělísko, které se používá pro řezání není nikdy dokonale ostré a proto v místě styku s opracovávaným povrchem se vytvoří malá kontaktní ploška, která se přenáší vzájemné silové působení. Na plošku působí vysoká tlaková napětí, která se směrem do materiálu zmenšuje a mění se v tahové napětí. Nejprve se keramika (sklo) v místě kontaktu deformuje pouze pružně, protože působící tahová napětí nejsou příliš velká. Až se na okraji styčné plošky nebo v její těsné blízkosti vyskytne trhlina a při dalším zvyšování zatížení dochází k jejímu růstu.

Když působí na vnikající tělísko mimo síly kolmé ke styčné ploše i síla smyková. Při dostatečné hloubce zaboření tělíska do materiálu vzniká rýha. Většinou se tak děje při vylamování a vytrhávání částic a to pouze za urči-

tých podmínek tvoří i mikroskopické třísky plastického charakteru. Na velikost působících napětí má vliv hlavně tvar tělíska a jeho vlastnosti s vlastnostmi opracovávaného materiálu. Velký vliv má modul pružnosti, tvrdost a pevnost, které by mělo mít tělíska co nejvyšší. Na opracování keramiky a skla se používá korund, karbid křemíku, karbid bóru, nitrid bóru a nejtvrdějším je diamant.

2.1.2 Vyvolání trhliny energetickým působením^{5,11}

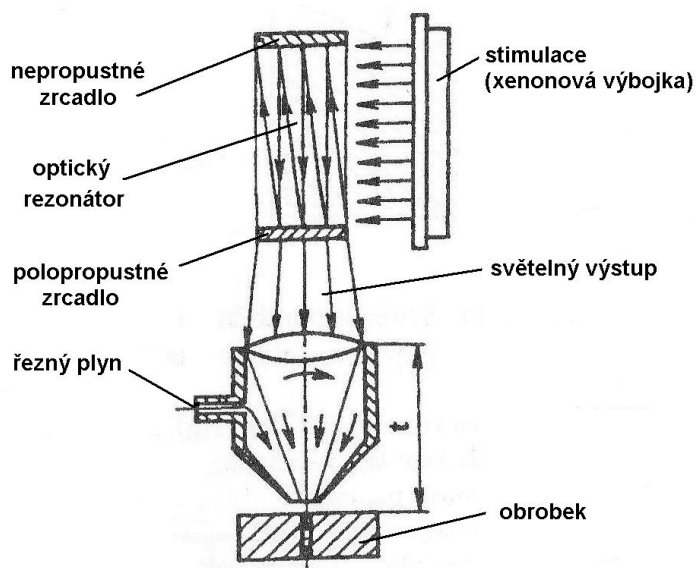
Lokální narušení materiálu lze způsobit, když přivádíme do tohoto místa proud energie, který je zkoncentrován tak, aby dosáhl vysoké hustoty toku energie. Nositelem proudu energie může být elementární kvanta energie (fotony) nebo elementární částice hmoty (elektrony, ionty). U fotonů je zdrojem energie laser a u elektronů a iontů je zdrojem plazmový hořák (spíše se používá k vyvolání růstu trhlín již existujících) nebo iontové dělo.

Obrábění paprskem laseru^{1,5,12}

Každý laser je charakterizován vlnovou délkou λ záření a jmenovitým výkonem. Vlnová délka je dána typem aktivního prostředí laseru. Při obrábění keramiky a skla musí být vlnová délka taková, aby daná látka byla vůči ní neprůzračná. Při obrábění skla, které propouští záření až do vlnových délek cca 4,5 μm se používají laser s náplní oxidu uhličitého. Pro opracování keramiky a skla přicházejí v úvahu laser o výkonu od několika desítek wattů výše. Laser pracuje dle konstrukce v kontinuálním režimu (vyřazuje nepřetržitě) nebo v pulsech (vysílá záření v krátkých trvajících pulsech, které trvají řádově mikrosekundy až milisekundy). Volbou doby pulsu a prodlevy mezi jednotlivými pulsy můžeme docílit potřebného poměru mezi intenzitou přívodu energie a celkovou energií dodanou do materiálu.

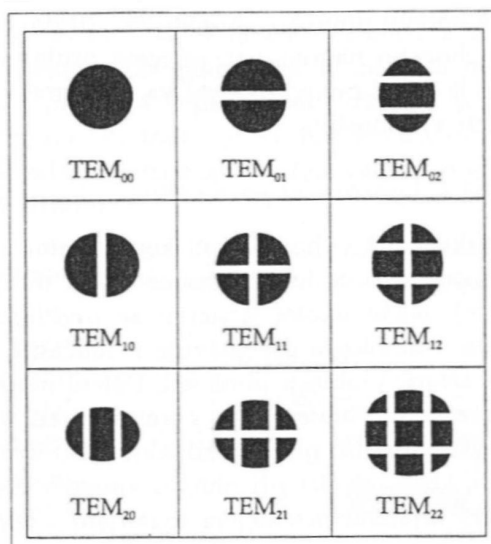
Při obrábění paprskem laser dochází k odebírání materiálu účinkem úzkého paprsku silného monochromatického světla soustředěného na velmi malou plošku. V místě dopadu se energie světelného nebo infračerveného záření, které se mění na energii tepelnou $10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. V místě dopadu dochází k prudkému ohřevu tenké povrchové vrstvy a teplo se šíří dále do materiálu vedením. Dle intenzity záření, době jeho působení a vlastnostech obráběného materiálu může dojít ke vzniku teplotních napětí, které způsobí roztavení materiálu v místě dopadu paprsku nebo k odpaření materiálu v tomto místě. V závislosti na zvoleném pracovním režimu (kontinuální, pulsech), výkonu laseru a pracovních podmínkách (rychlost pohybu paprsku) převládá jeden z uvedených efektů nad ostatními nebo se kombinují. Vždy se však jedná o efekty ostře lokalizované.

Při opracování keramiky a skla se laseru využívá k vytváření otvorů nebo povrchových rýh, k řezání s odtavováním a k dělení řízeným vedením trhliny. Laser se také využívá k opracování keramiky a skla odpařováním materiálu, ale již nesouvisí s lomovými procesy.

Obr. 2.1 Schéma obrábění laserem¹

Laserové záření má následující charakteristické vlastnosti:⁹

- bezdotykové působení,
- minimální rozbíhavost,
- jednobarevnost znamenající stejnou frekvenci a vlnovou délku λ (u laserů s náplní oxidu uhličitého CO_2 , $\lambda=10,6\mu\text{m}$, leží v infračervené oblasti spektra),
- tichá a precizní práce,
- laserový paprsek je souvislý, spojitý, soustředěně sevřený paprsek s velkou hustotou energie ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$), energie svazku připadající na jednotku plochy se měří kolmo na směr šíření a rozdělení intenzity laserového svazku v rovině kolmé na směr šíření je znázorněn na obr. 2.2,
- vysoký zářivý výkon ($10^{12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) představuje velké množství energie soustředěné na malé ploše a je orientované kolmo na směr šíření svazku.

Obr. 2.2 Energie svazku připadající na jednotku plochy⁹

Intenzita označená TEM_{00} se dá nejlépe zaostřit a má nejmenší ztráty a rozbíhavost.

2.2 Opracování s řízeným vedením jediné trhliny

Tato technologie se využívají především k dělení polotovarů a k oddělování větší částí materiálu (u tyčí, trubic a desek), tak kde má mít nový povrch jednoduchý tvar a to nejčastěji rovinný nebo mírně zakřivený. Velikou předností je jednoduchost, jednoduché nástroje, nízká spotřeba energie, vysoká produktivita, přesnost a dobrá jakost povrchu.

2.2.1 Lámání s naříznutím^{5,11}

Lámání s naříznutím je technologií pro dělení plochého skla nebo tyčí a u keramických substrátů se využívá při výrobě integrovaných obvodů. Lámání se provede po předchozím vytvoření trhliny na povrchu diamantem, řezacím kolečkem laserem, atd. Při vytvoření trhliny se sníží pevnost v místech, kde předpokládáme odlomení a aby lom neodbočil z naznačené dráhy. Účelem je tak snížit velikost lomového zatížení a tím zmenšit množství energie, které je akumulované v tělese a průběhu lomu se uvolňuje a tím klesá možnost větvení trhliny.

Odlomení je nutné provést hned po naříznutí, aby se předešlo případné reakci napětí v kořeni trhliny a snížení její účinnosti. Při lámání je třeba dbát na to, aby maximální tahové napětí bylo stále kolmé k požadované lomové ploše. Když je oddělovaná část krátká vzhledem k tloušťce, není tato metoda vhodná pro použití, protože se při odlamování projeví nepříznivě smyková napětí.

2.2.2 Sekání^{5,11}

Tato metoda se používá, když oddělovaná část je poměrně krátká vzhledem k tloušťce. Při dělení tyčinek a tlustostěnných trubiček menších průměrů. U skla lze tuto metodu použít do 8 mm. Tyčinka leží mezi dvěma nebo třemi ostrými sekacími noži, které se navzájem sbližují a vnikají do ní. Při nepatrném zaboření vzniká v tyčince u některého z břitů trhlina ve tvaru půlkruhu. Tento břit působí jako klín a tím vytváří v kořeni trhliny o vysokém tahovém napětí. Trhlina stále roste a v krátké době dochází k oddělení obou částí tyčinky.

2.2.3 Dělení kontrolovaným lomem^{5,11}

Trhlina je postupně vedena v požadovaném směru napětím vyvolaným teplotním polem. Využívá se pro dělení rotačně symetrických výrobků s tenčí stěnou nebo pro dělení desek.

Způsob, který se užívá pro vytvoření rovných a mírně zakřivených řezů v deskách. Na hraně tělesa v místě odkud má lom vyjít se naškrábnutí nebo podobným způsobem vytvoří malá trhlina. Pak se intenzivně ohřívá úzké pásmo podél čáry předpokládaného lomu (laserem). Ohřátý materiál se snaží zvětšit svůj objem a chladnější místa tomu brání. Na povrchu je teplota vyšší a dochází k působení tlaková napětí. Tahová napětí působí v určité hloubce pod

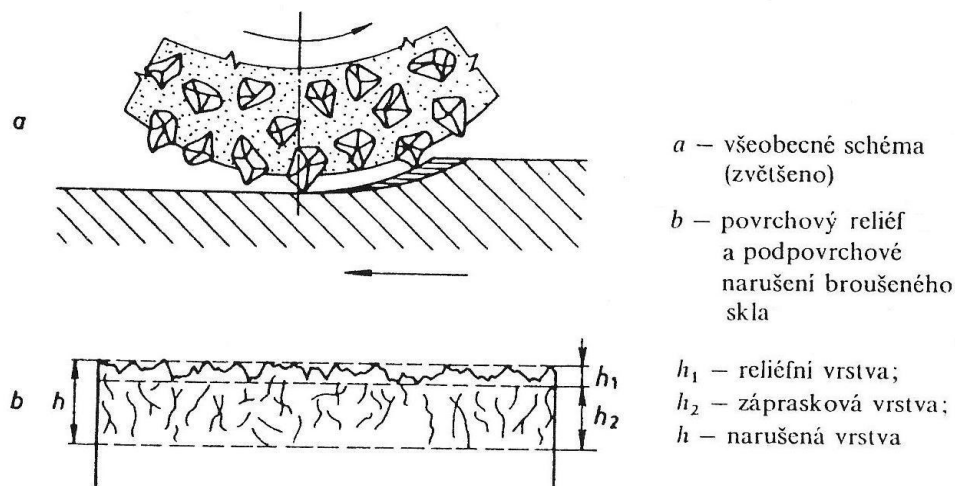
ohřátým místem a kromě toho i ve větší vzdálenosti od něj, kde se vyskytují v celé tloušťce stěny (tato napětí jsou nejdůležitější). Ohřáté pásmo je úzké a podlouhlé a proto se sečítají hlavně síly kolmé k jeho podélné ose. Výsledná tahová napětí v malé vzdálenosti za ním stačí k tomu, aby zajistilo pomalý růst trhliny ve směru ustupujícího tepelného zdroje.

2.3 Opracování s oddělováním malých částic

Do této skupiny můžeme zařadit broušení, obrábění ultrazvukem, řezání pilami, vrtání trubkovými vrtáky, obrábění vodným paprskem a soustružení, vrátání, frézování.

2.3.1 Broušení^{1,5,14,15}

Princip broušení je znázorněn na obr.2.3 a jde o mechanické narušování povrchu a odstraňování materiálu ve formě drobných částic účinkem velkého množství brusných zrn. Pohyb zrn a jejich silové působení na opracovaný materiál je vyvozováno brusným nástrojem. Obrobek je přitlačován a zároveň vykonává vůči jeho povrchu posuvný pohyb poměrně vysokou rychlostí. Při opracování keramiky a skla se jako brusivo nečastěji užívá korund, karbid křemíku, diamant a občas i karbid bóru nebo oxid zirkoničitý. Brusná zrna dle použití mívají rozměr od jednoho do několika set mikrometrů. V praxi se většinou používají nástroje pevně spojená (tzv. broušení vázaným brusivem), ale používají se i zrna volná, která se přivádějí mezi broušený povrch a nástroj ve formě suspenze ve vhodné kapalině. Při broušení vázaným brusivem se často přivádí do místa broušení vhodná kapalina, která plní účel odstraňovat produkty broušení a zároveň odvádí teplo, které při broušení vzniká.



Obr. 2.3 Princip broušení⁵

Při působení nástroje jsou zrna brusiva vtačována do povrchu materiálu, přičemž se po něm smýkají a popřípadě i odvalují. V místě kontaktu jednotlivých zrn s obrobkem vznikají značně vysoká napětí a v některých případech zde dochází i k plastickým deformacím mikroskopického rozsahu. Trhliny v broušeném materiálu vznikají jednak zvětšováním submikroskopických vad, přes něž zrna přejíždějí, jednak pod povrchem v důsledku plastického tečení.

Oddělování materiálu probíhá tak, že brusná zrna vylamují a vytrhávají svým smykovým úsilím malé částice. Tomuto procesu napomáhají i trhliny, které se vytvořili předchozí činností brusiva. Při přemísťování zrna dochází zároveň k odpružení, odlehčení části materiálu a k odprýskávání droboučkových střípků.

Povrch opracovaný volným brusivem je stejnoměrně drsný. Broušení vázaným brusivem na něm zanechává stopy jdoucí jedním směrem. Drsnost tohoto povrchu je proto ve směru opracování menší než kolmo na tento směr. Pro broušení je charakteristické, že kromě reliéfní vrstvy mikronerovnosti. Na povrchu materiálu vzniká narušená podpovrchová oblast s trhlínami a její tloušťka je až několikanásobkem výšky vrstvy reliéfní obr. 2.3b.

Drsnost broušeného povrchu (reliéfní vrstvy) je všeobecně malá. Pro dosažení lesklého povrchu (skla) je však nutné po broušení zařazovat ještě leštění. Proces leštění se částečně podobá broušení s ohledem na menší velikost zrn leštících materiálů. Projevuje se zde více vyhlazování mikroskopických nerovností povrchu plastickým tečením a navíc se uplatňují různé chemické procesy v závislosti na druhu opracovávaného materiálu a užitého leštidla. U skla se někdy užívá i leštění žárem nebo leštění chemické. Chemické leštění je leptání povrchu zředěnými kyselinami.

Broušení je složitý proces, při kterém se uplatňuje mnoho činitelů. Hlavně jde o strukturu, fyzikální a chemické vlastnosti obráběného materiálu i brusiva (modul pružnosti, pevnosti, tvrdosti, lomová houževnatost, ale i tepelná vodivost a měrné teplo). Proces taky závisí na rozměrech brusných zrn, hustotě zrn na jednotku plochy, četnost, orientace a tvar řezných hrotů a hran na aktivní části zrna, způsob spojení brusiva s pracovním nástrojem, mechanické i tepelné vlastnosti nástroje. Při použití řezných kapalin i jejich vlastnosti (tepelná vodivost, měrné teplo, viskozita, mazací schopnost a chemické vlastnosti). Proces broušení mohou ovlivňovat podmínky broušení jako je relativní rychlost pohybu brusných zrn vůči obráběnému povrchu (řezná rychlost), kinematika pohybu zrna (poloměr nástroje a hloubka odebírané vrstvy – resp. Hloubka, do jaké může dané zrno vniknout), délka nepřetržité dráhy zrna po materiálu, poměr doby, po kterou je zrno ve styku s obráběným povrchem, k době, po kterou se pohybuje volně, zda jsou zrna pevně vázána s nástrojem nebo zda se mohou i odvalovat, velikost sil, kterými je nástroj přitlačován k obrobku. Důležitou úlohu má i vlastní konstrukce brusného nástroje (tuhost, schopnost samoostření). Schopnost tzv. samoostření je vlastnost brousícího kotouče, která souvisí s poměrně málo pevným zakotvením brousícího zrna ve vazbě kotouče a při zvýšení řezných sil na otupených zrnech se tato vylomí a jejich funkci přebírají neotupená zrna. Brusný proces ovlivňuje i způsob přivádění řezné kapaliny a odvodu odpadních produktů broušení a konstrukce obráběného stroje i parametry obrobku (tuhost, možnost chvění).

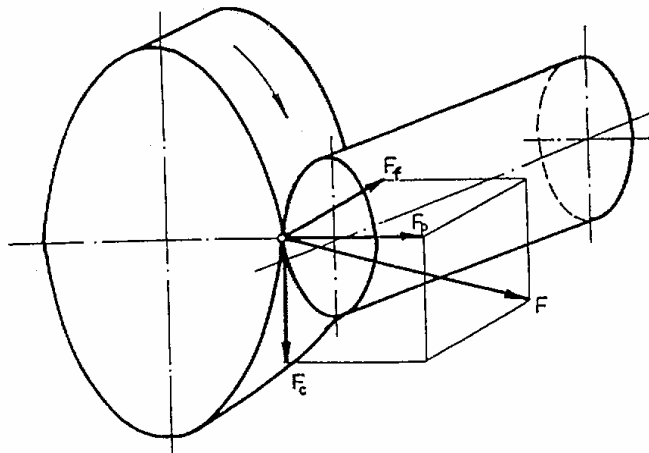
Při broušení působí na brusný nástroj jednak složky broušení, ale i síly odstředivé. Protože síly broušení jsou vzhledem k odstředivým silám malé, při pevnostních úvahách o brusném kotouči se zanedbávají.

Na obráběnou – broušenou – součást působí výsledná síla broušení F , která se rozkládá na tři složky.

F_c - řezná síla

F_p - pasivní síla

F_f - posuvná síla



Obr. 2.4 Výsledná síla F se rozkládá na tyto složky¹⁴

Broušení keramických materiálů je vhodné zejména na rozměrově a tvarově přesné úpravy povrchových vrstev. Při broušení lze dosáhnout průměrného úběru materiálu a metoda broušení se obvykle používá mokré broušení diamantovým kotoučem. Diamantové kotouče s jemnými zrnny jsou výhodné proto, že dochází řezat materiál obrobku bez destrukce. Je to způsobeno malou plochou části, které se dotýkají. Materiál se dostává do styku s pojivem, které se z kotouče vytrhávají a proto se kotouč značně opotřebovává.

Při broušení keramických materiálů neplatí zákon minimální tloušťky, protože plastická a elastická deformace v zóně před brusným zrnem je téměř nulová. V praxi se tloušťka odřezávané vrstvy reguluje nastavením hloubky řezu, při které se trhliny netvoří - kolem 1 mm.

Z hlediska silových poměrů je při broušení keramiky pasivní složka síly F_p mnohem větší než složka řezné síly F_c .

- Tvorba třísky při obrábění:

Broušení jako obráběcí metoda je charakterizována specifickými podmínkami tvorby třísky a vzniku obrobeného povrchu. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího i vnitřního tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že shoří (jiskření). Jednotlivá brousící zrna mají nepravidelný geometrický tvar, vysokou tvrdost, odolnost proti teplotě a nepravidelné poloměry ostří. Za řeznou rychlost při broušení se považuje obvodová rychlost brousícího kotouče, která je relativně vysoká.

- Řezné síly:

Celková řezná síla F působící v obecném směru mezi brousicím kotoučem a obrobkem se rozkládá. Ve směru řezné rychlosti leží řezná síla F_c , pasivní síla F_p je kolmá k broušené ploše a posuvná síla F_f působí ve směru podélného posuvu (kolmo na rovinou otáčení kotouče).

Velikost řezných sil závisí na způsobu broušení a na průřezu třísky, zrnitosti brusiva, struktuře brousícího kotouče, druhu a tvrdosti pojiva. S otupováním brousícího kotouče může vrůst řezná síla i několikanásobně.

- Koeficient broušení:

Koeficient broušení G je určen poměrem – odebraný materiál / objemové opotřebení brousícího kotouče.

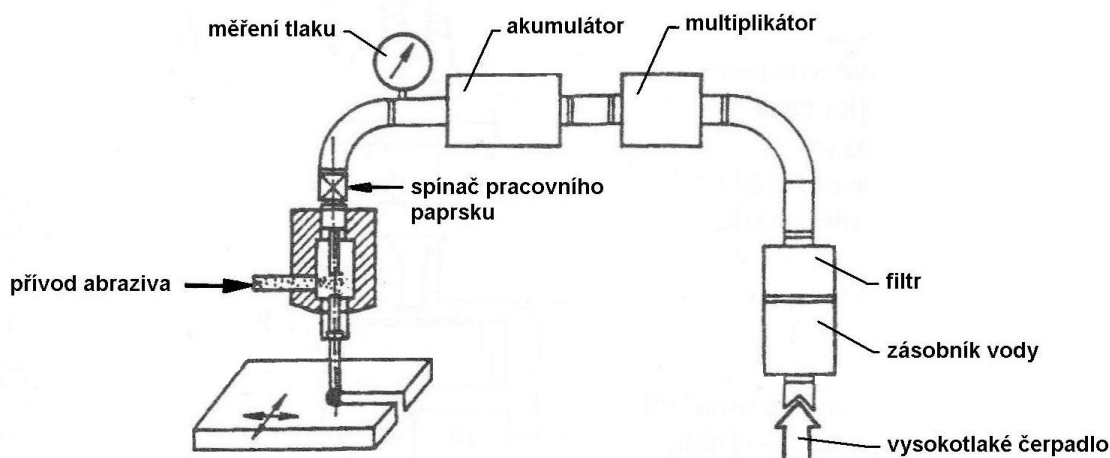
2.3.2 Obrábění vodním paprskem^{5,9,12}

Na povrch obráběného materiálu je vrhána velkou rychlostí zrna nebo podobné tvrdé částice. Při nárazu na povrch se kinetická energie letících částic mění v deformační práci. Keramika a sklo jsou materiály pružné a křehké, kde vznikají v oblasti kontaktu i při malé energii nárazu napětí, které je dostatečné pro vyvolání povrchových trhlin. Protnutím dvou nebo více trhlin vznikají malé částice (střípky), které se uvolňují nárazem dalšího zrna nebo odpružením materiálu po odskoku zrna z daného místa.

Obrábění vodním paprskem se využívá pro řezání keramiky a skla, kdy řezným nástrojem je paprsek vody o vysokém tlaku a vysoké rychlosti. Nejprve vzniká působením tlaku vody prohlubeň, která se mění v otvor. Potom dochází k prohlubování a k vytváření řezné spáry. Při nárazu vodního paprsku na obrobek dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše. V obráběném materiálu vznikají rázové vlny, které způsobují rychlou destrukci materiálu obrobku na hranici zrn – vznik mikrotrhlin. Mikrotrhliny se důsledkem dynamického zatížení rychle šíří, a tím dochází k rozrušování obráběného materiálu. Pro řezání keramiky se do vodního paprsku přidávají brousící zrna. Vzhledem k tomu, že na obrobek působí malé síly, můžeme obrábět tvarově složité součásti. V místě řezu nevzniká teplo a nedochází k tepelnému ovlivnění řezané plochy.¹²

Celou metodu lze zdokonalit zabudováním zásobníku brusiva (SiC, diamantový prach), které je podáváno přes ventil s klapkou a přepouštěním do speciálně tvarované otěruvzdorné směšovací komory. Zde dochází ke smíšení vody s brusivem a hybnost vodního paprsku se přenáší na brusivo, čímž se pracovní výkon řezání umocňuje.⁹

Nejčastěji se v praxi využívá řezání čistým vodním paprskem (lepenka, lamináty, atd.) a řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí (keramika, sklo, atd.).¹



Obr. 2.5 Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí¹

Výhody obrábění vodním paprskem:

- obrábí všechny materiály jakékoliv složení i tloušťky,
- nedochází k opotřebení nástroje,
- je zde vyloučen tepelný faktor,
- nízké řezné síly,
- bezhlučnost řezání,
- není nutné dodržovat přesnou vzdálenost trysky od povrchu materiálu,
- lze řezat tvarově i zvlněné materiály,
- minimální ztráty řezaného materiálu.

Nevýhody obrábění vodním paprskem:

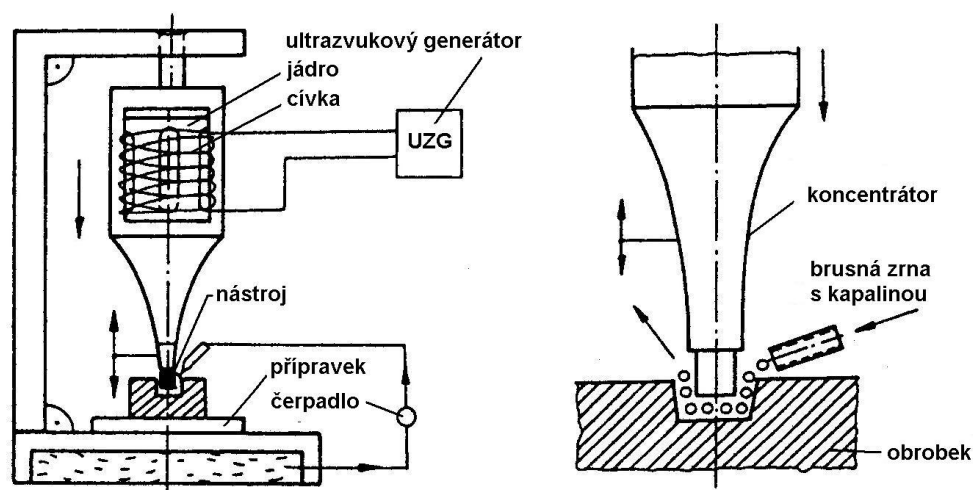
- vysoká pořizovací hodnota zařízení a vysoké provozní náklady a nízkým úběrem při obrábění velmi tvrdých materiálů.

2.3.3 Obrábění ultrazvukem^{1,5,9,12}

Ultrazvukové obrábění je proces, který využívá ultrazvukových vibrací nástroje při opracování tvrdých, křehkých a zejména elektricky nevodivých materiálů (keramika, sklo)

Podstatou metody je řízené rozrušování materiálů účinkem úderů abrazivní zrn (karbid boru, karbid křemíku), které jsou přiváděna v kapalině (voda, petrolej, atd.) mezi kmitající nástroj a obrobek. Koncentrace brusiva v kapalině bývá 30 až 40% hmotnosti v závislosti na tvrdosti obráběného materiálu. Proces úběru materiálu je společným důsledkem mechanického účinku abraziva a kavitačního účinku. Velká kinetická energie zrn abraziva způsobuje narušování celistvosti obráběného povrchu. Kavitační účinky umožňují rychlou výměnu opotřebovaných zrn za nové. Kapalně prostředí umožňuje lepší pronikání ultrazvukové energie do místa obrábění. Částice se odebírají pouze ve směru kmitání nástroje a obráběná plocha má vždy tvar nástroje. Obrobitelnost materiálů je úměrná jejich tvrdosti a křehkosti.

Princip zařízení pro ultrazvukové nárazové obrábění je znázorněno na obr. 2.6 a skládá se z ultrazvukového generátoru (zdroj střídavého proudu). Frekvence se pohybuje v rozsahu 20 až 30 kHz a amplituda kmitání 10 až 100 μm , které se mění na mechanické kmity v ultrazvukovém měniči. Ten je tvořen feromagnetickým jádrem složeným z tenkých dynamových plechů vložených do vinutí budicí cívky, do které se zmíněný proud přivádí. Působením magnetostrikce se jádro prodlužuje a zkracuje (Magnetostrikce je fyzikální jev, kde se ve střídavém magnetickém poli mění materiál jádra své rozměry ve frekvenci budícího proudu). K jádru je připevněn korozivzdorný koncentrátor tlaku, který zvětšuje axiální amplitudu na svém konci, kde je umístěn nástavec nástrojem. Na využití energie kmitů má velký vliv na tvar a velikost koncentrátoru tlaku. Obrobek je upnut na pracovním stole. Ultrazvukový měnič je veden ve stojanu, který musí zajišťovat kolmost nástroje k obráběné ploše obrobku.



Obr. 2.6 Princip zařízení pro ultrazvukové nárazové obrábění⁹

Rozměrová přesnost při obrábění tvrdých a křehkých materiálů je 0,02 až 0,1 mm. Při obrábění jemným brusivem lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0$, až 1,6 μm .

Rotační obrábění ultrazvukem

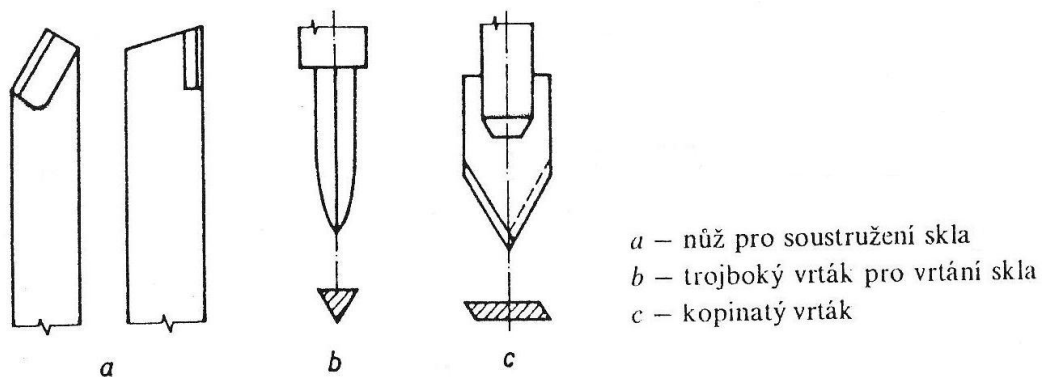
Rotační obrábění ultrazvukem spočívá ve vrtání diamantovým vrtákem, který je rozechvíván ultrazvukovými vibracemi o frekvenci 20 kHz. Při této operaci se nepřivádí brousící materiál do místa mezi nástrojem a obrobkem, ale nástroj sám řezá obráběný materiál. Amplituda vibrací se pohybuje v rozmezí 0,025 až 0,05 mm. Podélné kmitání špičky vrtáku způsobuje snížení tření mezi nástrojem a obrobkem a tím zabraňuje zadírání. Vzniká lepší průtok rezné kapaliny a tím se zvyšuje rychlost vrtání.

Předností metody je větší úběr materiálu a menší tlaky nástroje na jemné součásti. Používá se především pro nekovové materiály (keramika, sklo, oxid zirkonu, atd.). Další výhodou vrtání ultrazvukem je v tom, že nevznikají trhliny

na okraji díry u křehkých materiálů. U součásti s malým průměrem lze vrtat díry bez přerušení.

2.3.4 Soustružení, frézování, vrtání⁵

V méně náročných případech se užívají k opracování keramiky nebo skla nástroje – soustružnické nože, frézky, kopinaté vrtáky, které jsou na obr.2.7. Tyto nástroje mají břity ze slinutých karbidů wolframu a titanu. S ohledem na vysokou křehkost obráběného materiálu dochází v místě styku s břitem nástroje k tvorbě trhlinek, přičemž podél řezné hrany vzniká současně více trhlín. Narušený materiál se odděluje vylamováním a odprýskáváním jemných střípků. Předpokladem je přiměřeně malý posuv nástroje do záběru, důsledkem vzniku velkých řezných sil může dojít k rozrušení celého obrobku. Mechanismus úběru materiálu je podobný jako u broušení.



Obr. 2.7 Nástroje pro opracování keramiky a skla⁵

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL

Řezné síly a jejich složky lze měřit dvojím způsobem:

- nepřímým měřením – měří se jiná veličina a z ní se pak vypočítá řezná síla,
- přímým měřením – zařízení pro měření řezných sil (dynamometry).

3.1 Nepřímé měření řezných sil

Nepřímé metody měření řezných sil jsou vhodné na zajištění střední hodnoty řezné síly s omezenou přesností. Pro běžná měření v praxi si těmito hodnotami vystačíme. Změřením příkonu motoru obráběcího stroje nebo krouťacího momentu na vřetenu.

Nejpoužívanější nepřímou metodou je měření příkonu obráběcího stroje wattmetrem. Nejprve se změří příkon stroje při běhu naprázdno a potom příkon při zatíženého obráběcího stroje při odebrání třísky. Z těchto hodnot vypočítáme příkon potřebný k obrábění. Z potřebného příkonu k obrábění lze vypočítat tangenciální složku řezné síly. Vypočtená hodnota se považuje za přibližnou, protože účinnost hnacího elektromotoru při chodu naprázdno a při zatížení není stejná.²²

Vzorec pro příkon, který je potřebný k obrábění:²²

$$P_f = P_m - P_o \quad (3.1)$$

P_f příkon potřebný k obrábění [W],

P_o příkon stroje při běhu naprázdno [W],

P_m příkon při zatížení obráběcího stroje při odebrání třísky [W],

Vzorec pro výpočet tangenciální složku řezné síly:²²

$$F_c = \frac{P_f \cdot \eta \cdot 60}{v_f} \quad (3.2)$$

F_c tangenciální složka řezné síly [N],

P_f příkon potřebný k obrábění [W],

η účinnost hnacího elektromotoru [-],

v_f řezná rychlost [m.min⁻¹].

3.2 Přímé měření řezných sil

Pro přesnější určení velikosti řezné síly a jejích složek se v praxi používají metody přímého měření pomocí dynamometrů. Dynamometry jsou založeny na principu měření pružných deformací vybraných elementů při zatížení řeznou silou – její složkou. Směr a velikost deformace se snímají a vyhodnocují tak, aby z nich byly zřejmé hodnoty i směr měřených složek řezné síly:

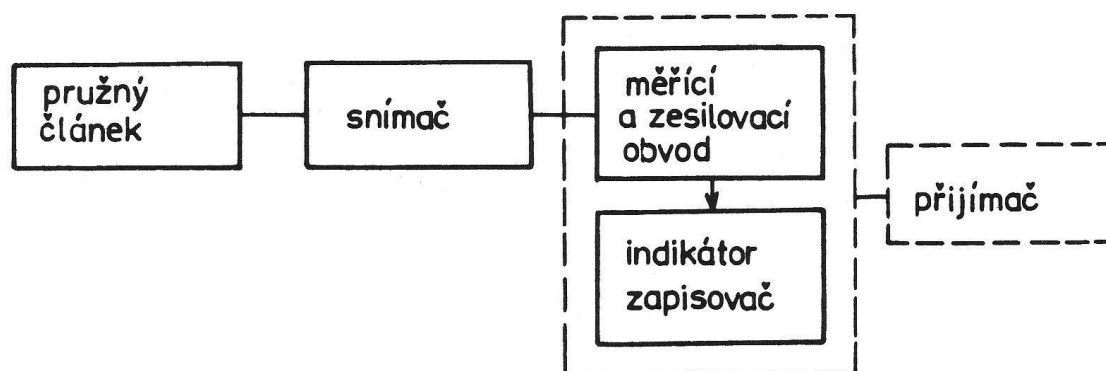
Principy a konstrukce dynamometrů jsou různé:²²

- podle typu snímače:
 - mechanické dynamometry
 - elektrické dynamometry
 - pneumatické dynamometry
 - hydraulické dynamometry
- podle počtu složek řezných sil:
 - jednosložkové
 - dvousložkové (nejpoužívanější)
 - třísložkové

Druhů operací pro než dynamometry používáme:

- broušení
- soustružení
- frézování
- vrtání

Kladené požadavky na aparaturu k měření řezných sil – přesnost, minimální rozměry, dostatečný rozsah, citlivost, spolehlivost, minimální ovlivňování složek navzájem, cejchování, stabilita a malá setrvačnost.



Obr. 3.1 Blokové schéma dynamometru ²¹

3.2.1 Mechanické dynamometry

Základním členem je pružně deformační těleso, které se vlivem řezné síly deformuje. Přesnost mechanického dynamometru je 1 až 2%.

Výhody - jednoduchý, spolehlivý a cenově levný.

Nevýhody - malý rozsah měření, závislost deformace na teplotě, velká setrvačnost.

3.2.2 Elektrické dynamometry^{21,22}

Elektrické dynamometry jsou nejrozšířenější skupinou. Jejich základem jsou snímače, které mění měřenou řeznou sílu na elektrickou veličinu, která je dále zesílena a zpracována.

Tyto snímače můžeme rozdělit do dvou skupin:²²

- snímače aktivní – snímače, jejichž výstupní veličinou je elektrické napětí nebo proud,
- snímače pasivní – snímače, jejichž výstupní veličinou je elektrický odpor, indukce, kapacita, které se musí dále v obvodě měnit na napětí nebo proud.

Výhody – přesnost a citlivost, rychlost měření, registrace výsledků a časově neomezená doba měření.

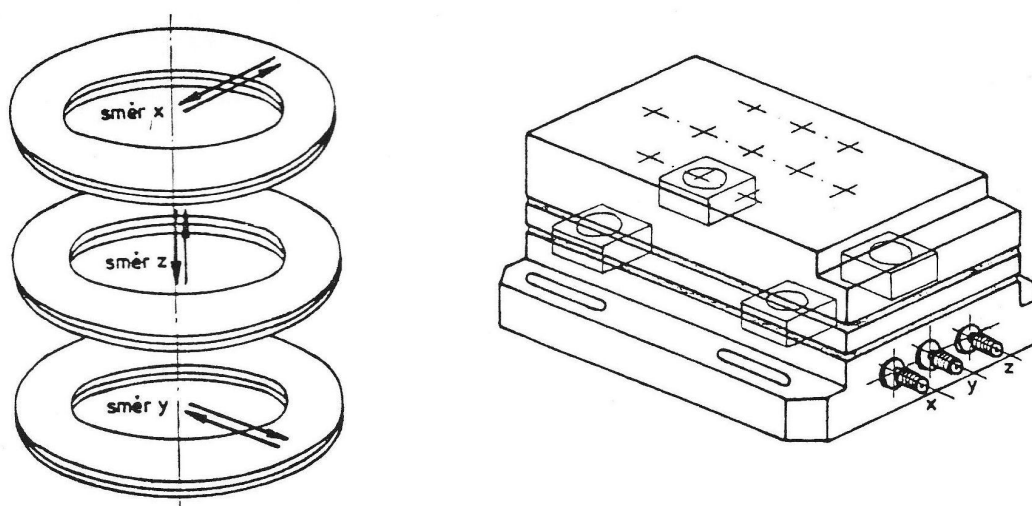
Nevýhody – pořizovací cena a náklady na údržbu, složitost zařízení.

Dynamometry tenzometrické – princip je založen na změně odporu vodiče se změnou rozměrů při deformaci. Při změně odporu tenzometru, způsobenou deformací lze vypočítat napětí v místě, kde přilepen tenzometr.

Dynamometry piezoelektrické - funguje na piezoelektrickém jevu, který spočívá ve vlastnostech některých krystalických dielektrik, kde vzniká vlivem deformace elektrická polarizace a tím i elektrický náboj. Až mechanické napětí zmizí, tak se dielektrikum dostane do původního stavu.

Výhody – obrovský rozsah měření (nemá pružný člen), lineární křivka, vysoká spolehlivost, opakovatelnost

Nevýhody – pořizovací cena a náklady na údržbu, nedokáže měřit dlouhé časové děje.



Obr. 3.2 Schéma kompaktního tří složkového piezoelektrického dynamometru²²

Mezi přední světové výrobce piezoelektrických dynamometrů patří švýcarská firma KISTLER, která vyrábí kompaktní tří složkový dynamometr pro frézování. Pro broušení nebo soustružení lze použít piezoelektrický dynamometr typu 9257.

Dynamometr obsahuje čtyři mezi sebou odpovídajícím způsobem propojené piezoelektrické snímače. Každý snímač je konstruován tak, aby snímal zatížení ve třech na sebe navzájem kolmých osách x, y, z. Snímač se skládá ze tří sad kruhových destiček, které jsou piezoelektrického materiálu. Tyto destičky jsou vyrobeny tak, aby se při zatížení požadovaným směrem vytvořil na čelních plochách odpovídající elektrický náboj. Náboj pomocí kabelu je veden do předzesilovače ke zpracování a z nich do registračního zařízení s napěťovým vstupem. V tomto zařízení můžeme přímo odečítat měřené hodnoty složek řezné síly.



Obr. 3.3 Kompaktní piezoelektrický dynamometr typ 9257 firmy KISTLER²³

Dynamometry uhlíkové - dva odpory v rámu, kde měříme odpor z uhlíkových destiček, dynamometr nemá pružný člen a deformuje se zde sloupec destiček z uhlíku.

Dynamometry kapacitní – kondenzátoru, deformace se převádí na kapacitu a z ní dostaneme sílu.

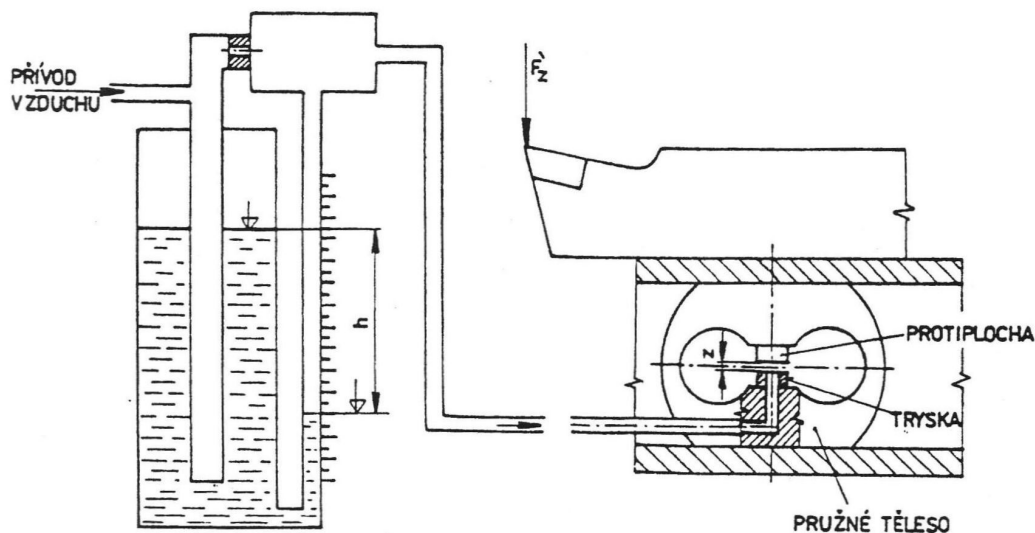
3.2.3 Pneumatické dynamometry^{21,22}

Základním členem je pružně deformační těleso, které se vlivem řezné síly deformují. Z trysky určitého průřezu, která je umístěna na jedné z ploch tělesa proudí tlakový vzduch na protiplochu umístěnou v malé vzdálenosti. Tato protiplocha je v určitém rozsahu stavitelná. Při deformaci pružného tělesa se vzdálenost mezi ústím trysky a protiplochou zmenšuje v závislosti na velikosti působícího řezného odporu a tím dochází ke snížení objemu vzduchu a tím

k následné změně tlakových poměrů ve vodním regulátoru tlaku. Tuto změnu tlaku měříme.

Výhody – jednoduchost, snadná obsluha a lze měnit citlivost dynamometru.

Nevýhody – velká setrvačnost.



Obr. 3.4 Schéma konstrukce pneumatického dynamometru²²

3.2.4 Hydraulické dynamometry

U hydraulických dynamometrů se využívá nestlačitelnost kapalin. Řeznou silou nebo krouticím momentem při obrábění se deformuje pružný člen, kterým je v tomto případě membrána. Tato deformace membrány se přenáší kapalinou na zobrazovací nebo registrační zařízení.

Výhody – jednoduchost a velmi jednoduchá konstrukce vícesložkových dynamometrů, kapalina nemění svůj objem a přesnost měření.

Nevýhody – odvzdušňování, malá tuhost a citlivost, ovlivnitelnost změnou teploty a velká setrvačnost.

4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK BROUŠENÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Zkoušky broušení proběhly na VUT Brně, fakultě strojíního inženýrství a oboru strojírenské technologie. Zkoušky broušení keramického materiálu byly zaměřeny na řezné síly a drsnost povrchu obrobené plochy.

4.1 Vlastnosti obráběné keramiky

Zkušební vzorek keramiky SSiC Rocar S, který vyrábí firma CeramTec Šumperk. Rozměry zkušební vzorku 50x50x7. Vybrané mechanické vlastnosti zkušební keramiky jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab.4.1 Vybrané mechanické vlastnosti keramiky SSiC Rocar S¹⁷

Materiál	Rocar S (S-SiC)
Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	3,15
Pevnost v ohybu [MPa]	410
Pevnost v tlaku [MPa]	3500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	430
Tvrdost [HV 10]	2300
Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	4,4
Koeficient tření [-]	0,17
Odolnost proti teplotním výkyvům [°C]	350
Absorpční schopnost [%]	0

Konstrukční keramika vyniká svou tvrdostí, pevností v tlaku, vysokou otěruvzdorností a tepelnou odolností, chemickou odolností a nízkou hmotností. Nevýhodou konstrukční keramiky je při obrábění křehkost, špatná obrobitelnost a vyšší náklady při opracování.

4.2 Metodika zkoušek

Zkušební vzorky byly broušeny brusku na plocho BPH 320 A, kterou vyrábí německá firma Junker. Vzorky byly broušeny konvenčním kyvadlovým broušením bočních stěn na ploše 50x7mm. Každá zkouška byla provedena 3krát za stejných řezných podmínek se dvěma dvojzdvihy vzorku. Ve všech případech byl první nájezd do záběru proveden nesousledným způsobem (vektor řezné rychlosti v_c a rychlosti posuvu stolu v_f měly opačný smysl). Jako chladicí kapalina byla použita Cimtec M26 v koncentraci 5% a množství 10 l.min⁻¹. V průběhu zkoušek nebyly brousící kotouče oživovány.

Specifikace diamantových brousících kotoučů:

2 – 175 – 20 / 2	B – VII	K100	D107 PDA 321 N 55
2 – 175 – 20 / 2	B – XV	K100	D107 PDA 321 N 55

Tab. 4.2 Řezné podmínky zkoušek:

Parametr	Měřená hodnota
Řezná rychlost - v_c [m.s ⁻¹]	23,1
	30,4
Rychlost posuvu stolu - v_f [m.min ⁻¹]	6,7
	10
	16
Pracovní záběr ostří - a_e [μm]	50
	75
	100

Snímačem složek řezné síly byl piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, který byl propojen přes přepínač kanálů a zesilovače KISTLER 5011 s osobním počítačem vybaveným univerzální měřicí kartou. Z pořízených záznamů byly pomocí speciálního řídicího software vypočteny pro každý záznam hodnoty F_p a F_c pro tři dojezdvihy vzorku. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze 1 až 4. Z těchto naměřených hodnot byly vypočteny střední hodnoty pro každé měření, které jsou uvedeny v příloze číslo 5 až 8.

4.3 Vyhodnocení zkoušek

4.3.1 Řezné síly

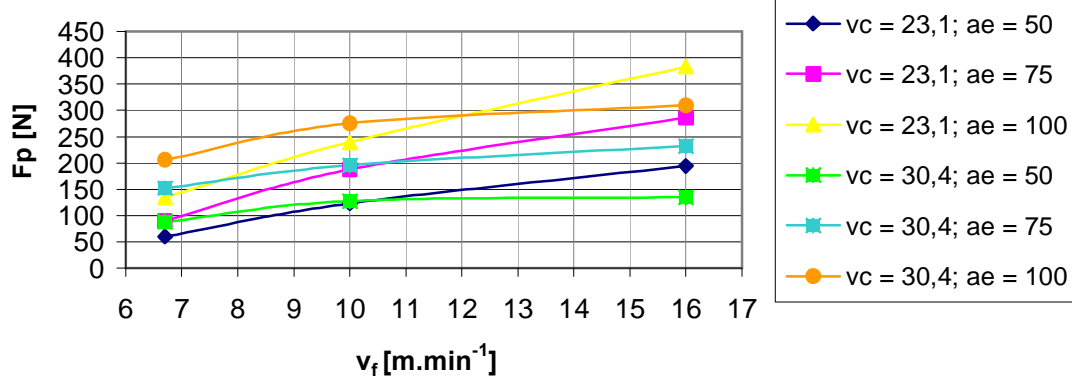
Hodnoty jednotlivých složek řezné síly lze považovat za výchozí údaj pro posouzení obrobitelnosti materiálů broušením. Vysoké tvrdosti keramiky způsobuje obtížné vnikání ostří brusného zrna do obrobku a proto je pasivní síla F_p až 4krát větší než řezná síla F_c , která způsobuje odřezání třísky.

Velikost řezné síly F_c má vliv na výkon motoru potřebného na odřezání nastavené hloubky třísky a_e . Při dlouhodobém testování a konstantních řezných (technologických) podmínkách lze pozorovat zvyšování této složky řezné síly (tzv. kotouč se zanáší) nebo snižování hodnoty síly (tzv. kotouč pracuje v režimu samoostření).

Vzhledem k tomu, že k odebrání téměř celé nastavené hodnoty pracovního záběru ostří a_e , dochází v nesousledném zdvihu a prvního dvojzdvihu obrobku. Všechny následující závislosti budou zpracovány na základě hodnot F_c a F_p z nesousledného zdvihu (N).

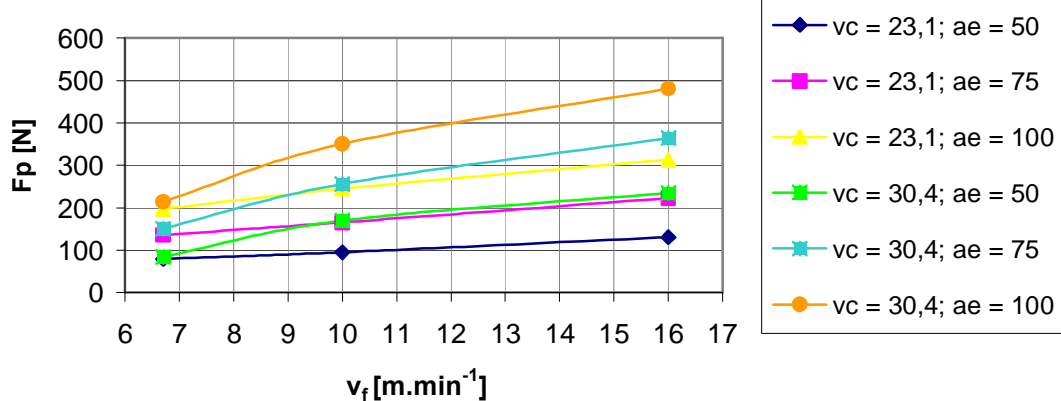
Z řezných podmínek mají vliv na velikosti složek řezných sil rychlost posuvu stolu v_f , hloubka řezu a_e a řezná rychlost diamantového kotouče v_c .

**Závislost pasivní síly F_p na rychlosti posuvu stolu v_f
pro kotouč s pojivem B-VII**



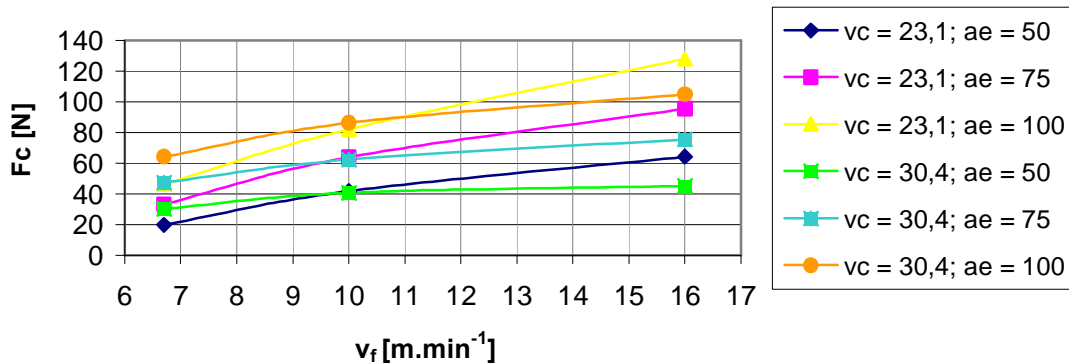
Obr. 4.1 Závislost pasivní síly F_p na rychlosti posuvu stolu v_f pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost pasivní síly F_p na rychlosti posuvu stolu v_f
pro kotouč s pojivem B-VX**



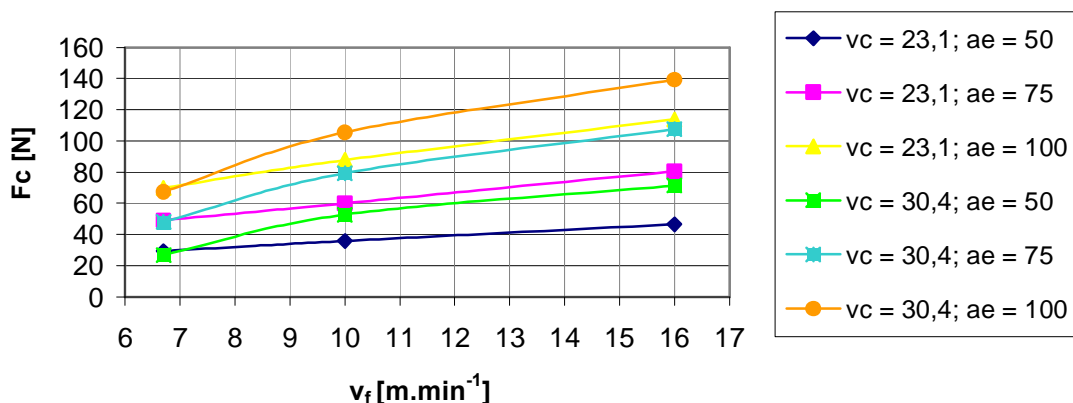
Obr. 4.2 Závislost pasivní síly F_p na rychlosti posuvu stolu v_f pro kotouč s pojivem B-VX

**Závislost řezné síly F_c na rychlosti posuvu stolu v_f
pro kotouč s pojivem B-VII**



Obr. 4.3 Závislost řezné síly F_c na rychlosti posuvu stolu v_f pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost řezné síly F_c na rychlosti posuvu stolu v_f
pro kotouč s pojivem B-VX**

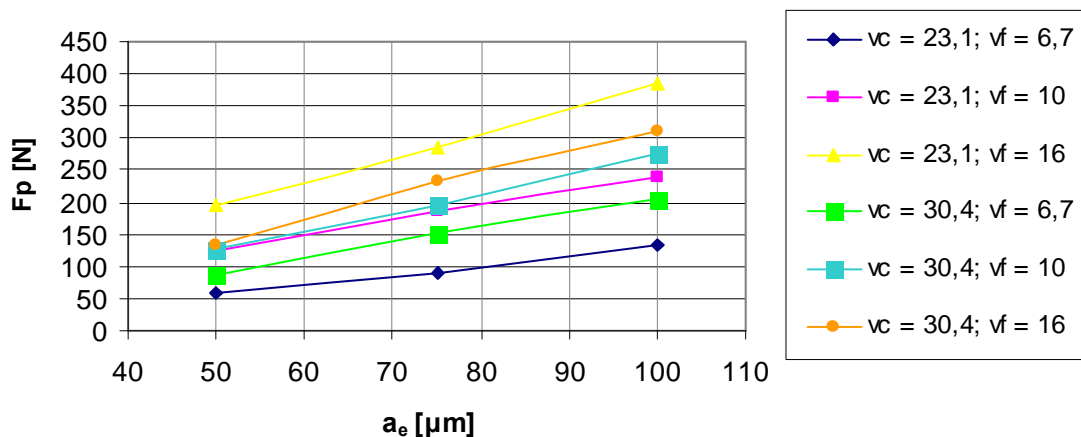


Obr. 4.4 Závislost řezné síly F_c na rychlosti posuvu stolu v_f pro kotouč s pojivem B-VX

Při zvyšování hodnoty rychlosti posuvu stolu v_f 6,7 až na 16 m.min⁻¹ se hodnoty složek řezných sil zvyšují. U kotouče s měkčím pojivem B-VII obě síly při nižších hodnotách $v_f = 6,7$ až 10 m.min⁻¹ s rostoucí řeznou rychlostí v_c rostou a při nejvyšší hodnotě $v_f = 16$ m.min⁻¹ společně klesají.

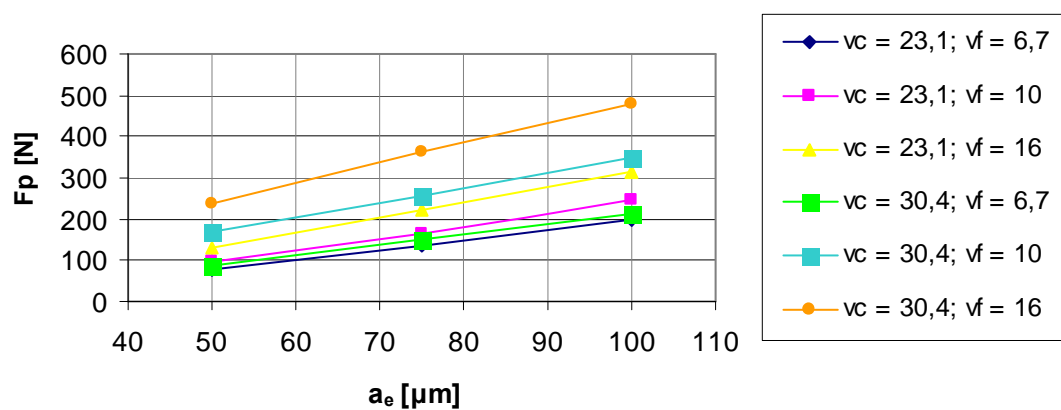
Příklad: Při řezné rychlosti $v_c = 30,4$ m.s⁻¹, šířce záběru $a_e = 100 \mu\text{m}$ a při rychlosti posuvu stolu $v_f = 16$ m.min⁻¹ je pasivní síla $F_p = 309,4$ N a řezná síla $F_c = 104,9$ N (pro kotouč s pojivem B-VII) a pasivní síla $F_p = 480,9$ N a řezná síla $F_c = 139,3$ N (pro kotouč s pojivem B-VX).

**Závislost pasivní síly F_p na pracovním záběru ostří "ae"
pro kotouč s pojivem B-VII**



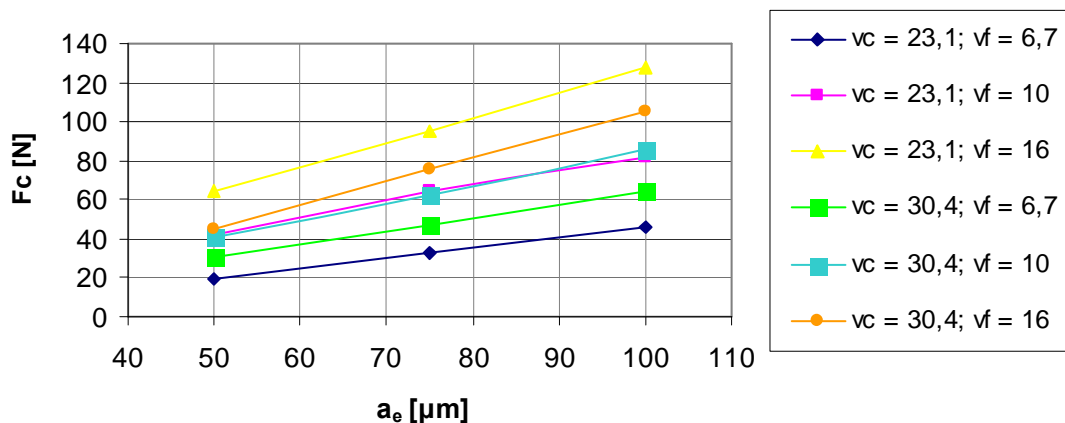
Obr. 4.5 Závislost pasivní síly F_p na pracovním záběru ostří „ a_e “ pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost pasivní síly F_p na pracovním záběru ostří "ae"
pro kotouč s pojivem B-VX**



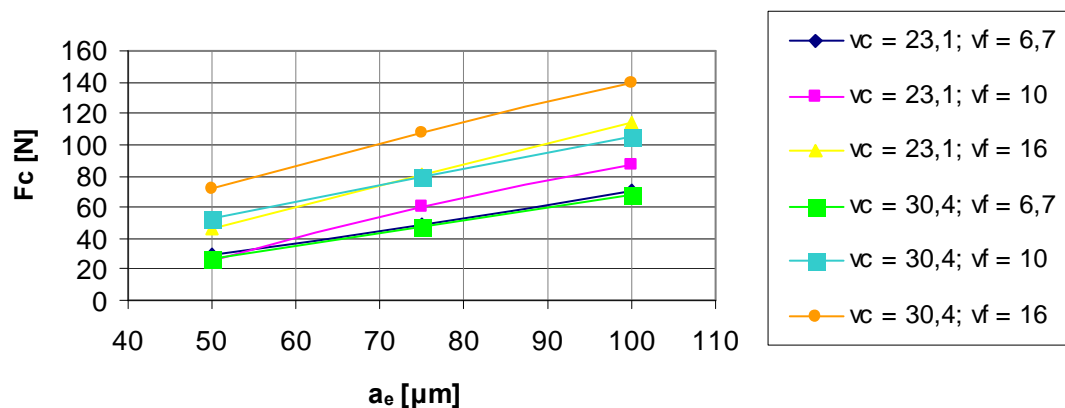
Obr. 4.6 Závislost pasivní síly F_p na pracovním záběru ostří „ a_e “ pro kotouč s pojivem B-VX

**Závislost řezné síly F_c na pracovním záběru ostří "ae"
pro kotouč s pojivem B-VII**



Obr. 4.7 Závislost řezné síly F_c na pracovním záběru ostří „ a_e “ pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost řezné síly F_c na pracovním záběru ostří "ae"
pro kotouč s pojivem B-VX**



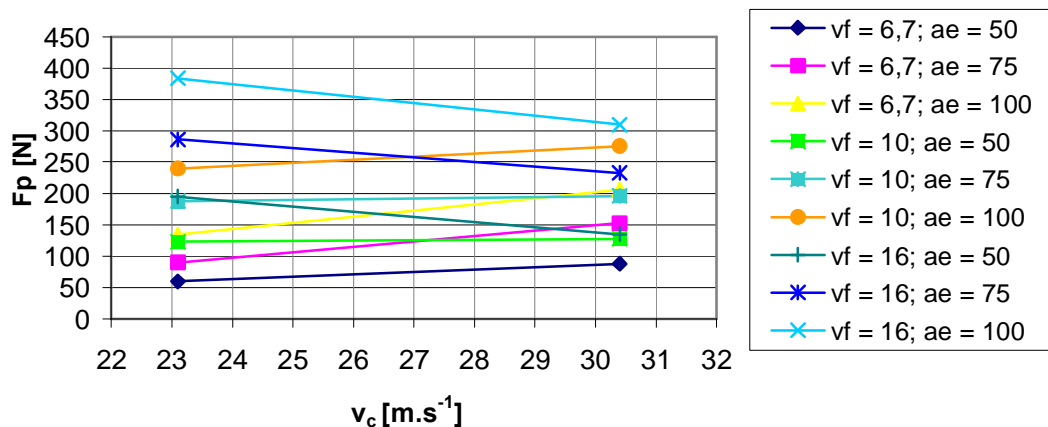
Obr. 4.8 Závislost řezné síly F_c na pracovním záběru ostří „ a_e “ pro kotouč s pojivem B-VX

Při zvyšování hodnoty šířky záběru řezu a_e od 50 až do 100 μm se naměřené hodnoty složek řezných sil zvyšují. Zde se také projevuje rozdílná tvrdost kotouče s pojivem B-VII a B-VX.

Příklad: Při řezné rychlosti $v_c=23,1 \text{ m.s}^{-1}$, šířce záběru $a_e=100\mu\text{m}$ a při rychlosti posuvu stolu $v_f=16 \text{ m.min}^{-1}$ je pasivní síla $F_p=383,5 \text{ N}$ a řezná síla $F_c=127,9 \text{ N}$

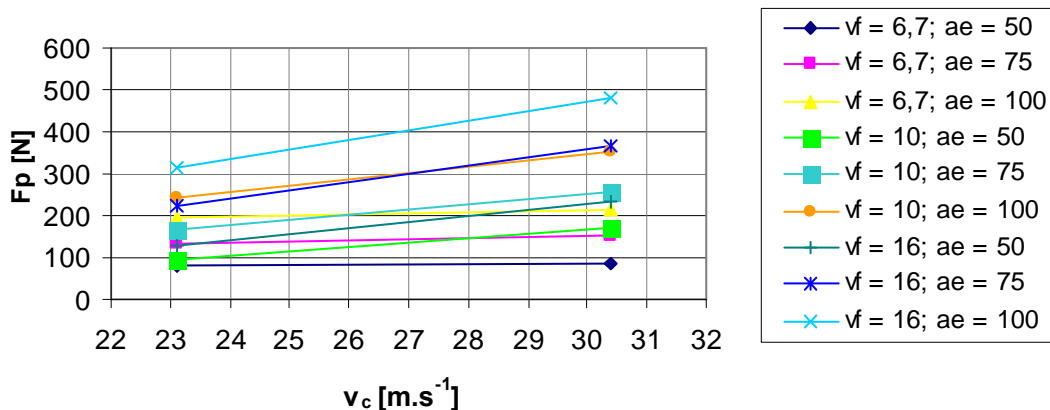
(pro kotouč s pojivem B-VII) a pasivní síla $F_p=313,6$ N a řezná síla $F_c=113,9$ N (pro kotouč s pojivem B-XV). Tento pokles složek sil při stejné řezné rychlosti je způsobeno rozdílnou tvrdostí pojiva. Kotouč s pojivem B-XV má větší tvrdost než kotouč s pojivem B-VII.

**Závislost pasivní síly F_p na řezné rychlosti v_c
pro kotouč s pojivem B-VII**



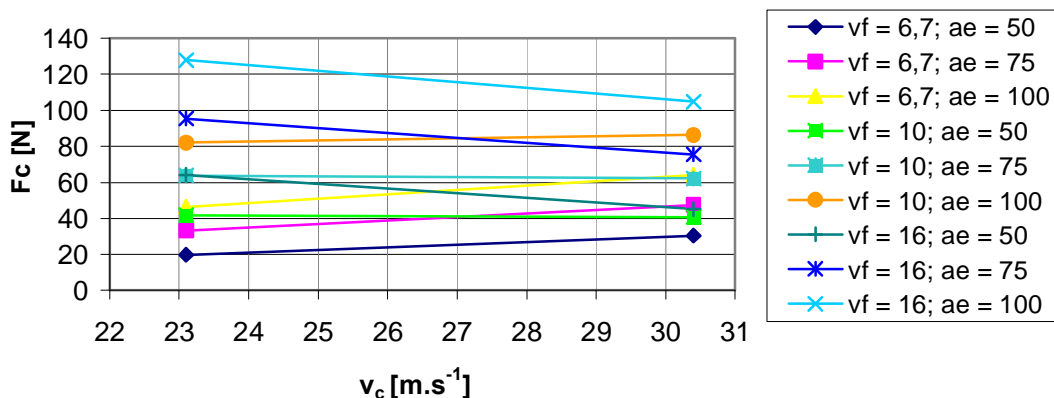
Obr. 4.9 Závislost pasivní síly F_p na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost pasivní síly F_p na řezné rychlosti v_c
pro kotouč s pojivem B-VX**



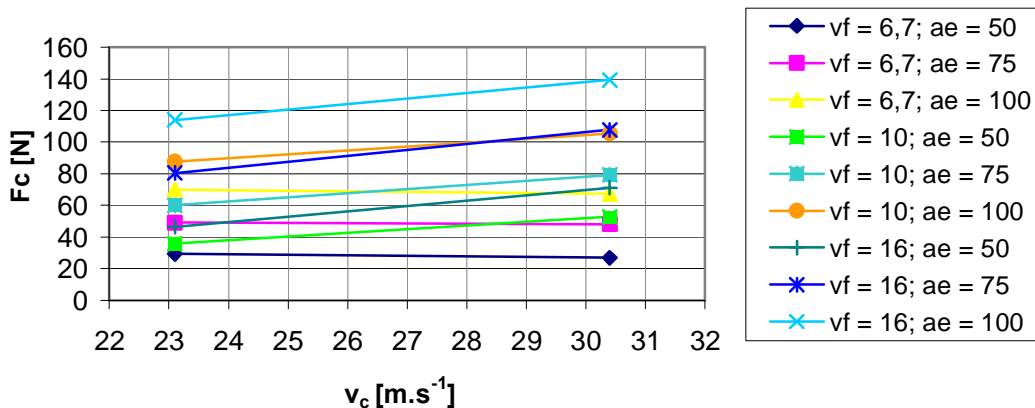
Obr. 4.10 Závislost pasivní síly F_p na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-XV

**Závislost řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c
pro kotouč s pojivem B-VII**



Obr. 4.11 Závislost řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c
pro kotouč s pojivem B-VX**



Obr. 4.12 Závislost řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-VX

Při zvýšení řezné rychlosti u kotouče B-VII dochází ke klesání složek řezných sil, ale u kotouče B-VX dochází k nárůstu složek řezných sil. Z toho lze vyvodit závěr o nepříznivém vlivu tvrdosti pojiva na řezivost brousícího kotouče. Lze konstatovat, že kotouč s pojivem B-VII má lepší vlastnosti při broušení keramiky Rocar S (SSiC) než kotouč s pojivem B-VX za stejných pracovních podmínek.

4.3.2 Drsnost povrchu obrobené plochy

Pro konstrukci součásti je velmi důležitá drsnost povrchu obrobené plochy, která má vliv na spolehlivost a životnost zařízení. Drsnost povrchu obrobené plochy je základním ukazatelem kvality obrobeného povrchu. Drsnost broušeného povrchu je dána stopami, které zanechávají brusná zrna kotouče na broušeném obrobku a závisí na charakteristice brousícího kotouče.

Drsnost obrobené plochy hodnotíme:

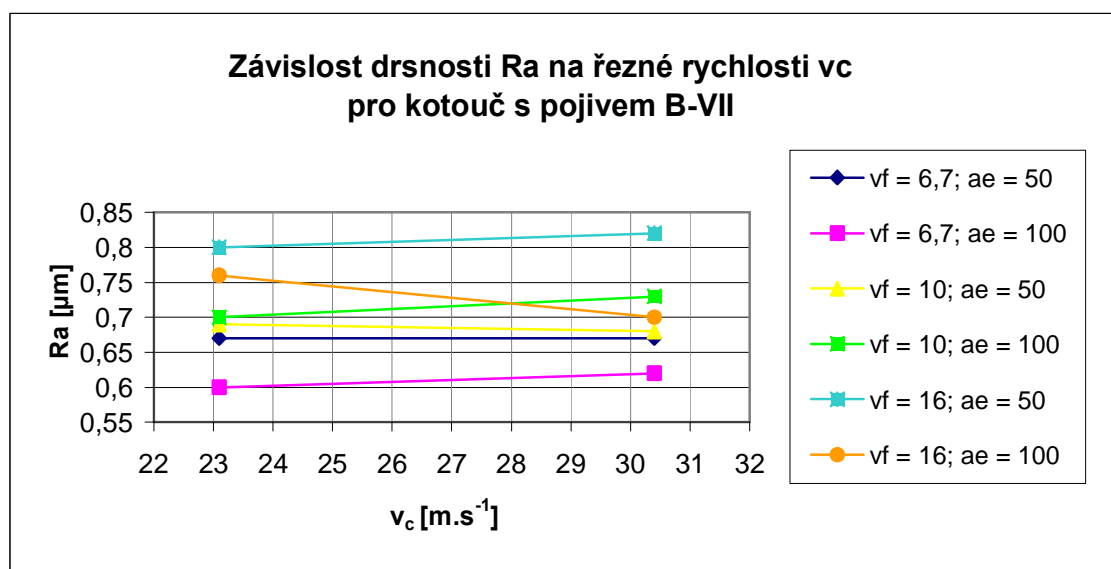
- ***Ra*** - střední aritmetická úchylka profilu (vzdálenost profilu nerovností od střední čáry profilu)
- ***Rm*** - největší výška profilu (je vzdálenost mezi čarami rovnoběžnými se střední čarou profilu, označující největší a nejnižší bod profilu na měřené délce)

Drsnost obrobené plochy byla měřena na bočních stěnách vzorků a to ve směru kolmém na stopy po obrábění za těchto podmínek – tab.4.3. Hodnoty drsnosti povrchu po broušení jsou uvedeny v příloze číslo 9 a 10.

Tab. 4.3 Drsnost povrchu byla měřena za těchto podmínek:

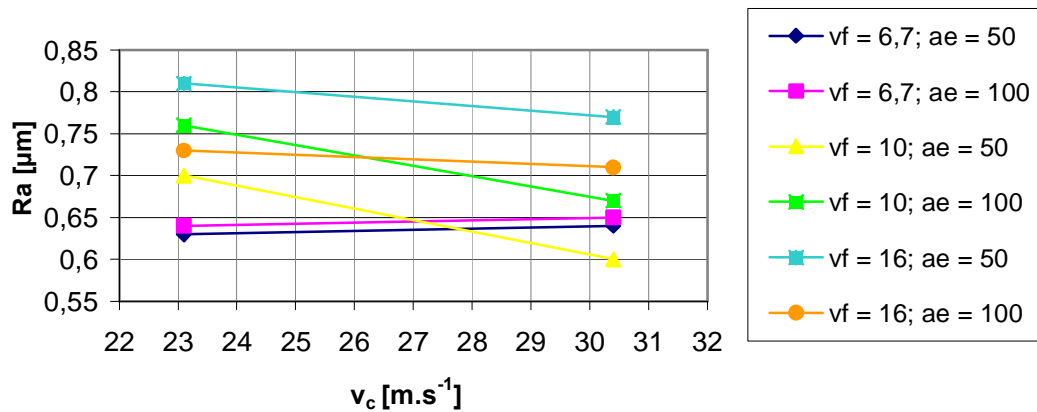
Parametr	Měřená hodnota
Řezná rychlost - v_c [m.s^{-1}]	23,1
	30,4
	6,7
Rychlost posuvu stolu - v_f [m.min^{-1}]	10
	16
	50
Pracovní záběr ostří - a_e [μm]	100
	50

Vyhodnocení drsnosti povrchu obrobené plochy:



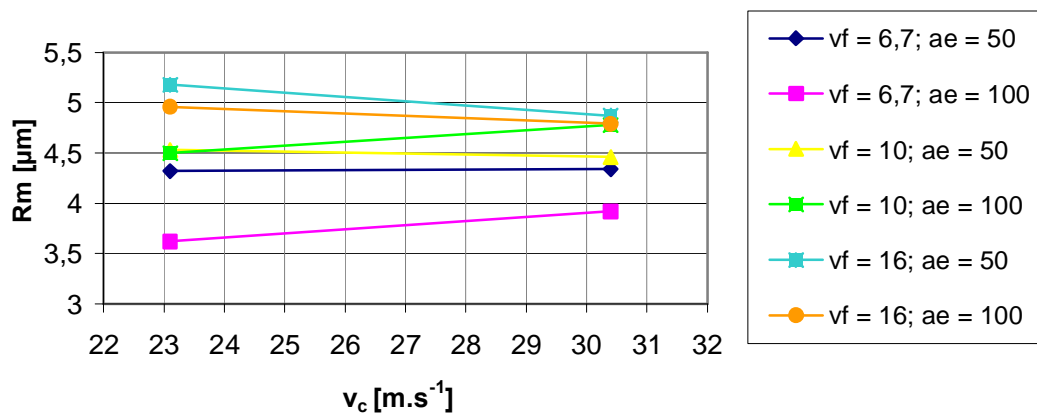
Obr. 4.13 Závislost drsnosti R_a na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-VII

**Závislost drsnosti R_a na řezné rychlosti v_c
pro kotouč s pojivem B-XV**

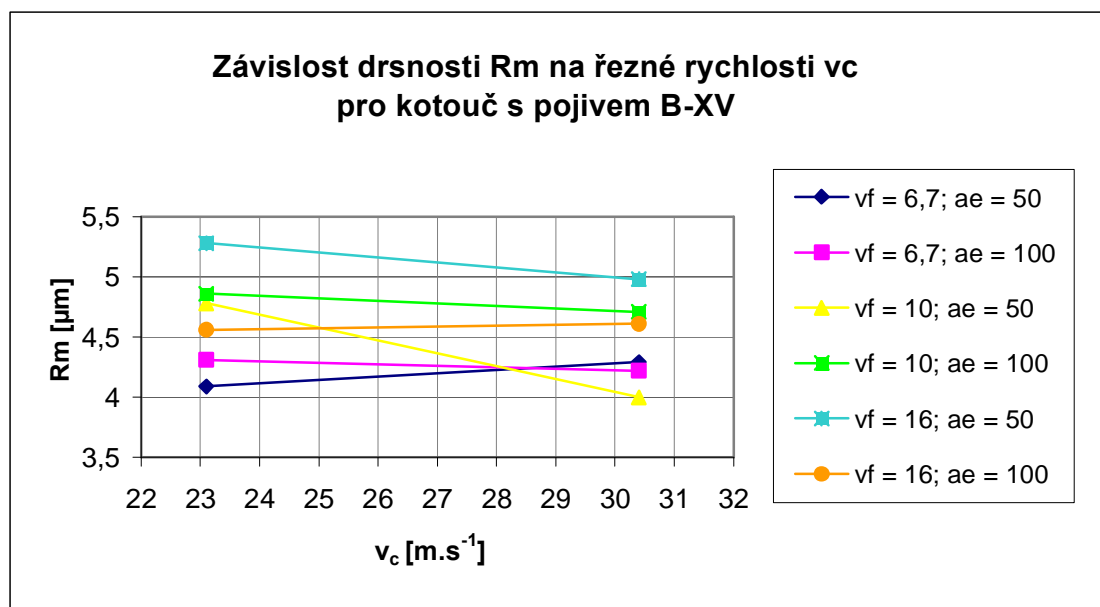


Obr. 4.14 Závislost drsnosti R_a na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-XV

**Závislost drsnosti R_m na řezné rychlosti v_c
pro kotouč s pojivem B-VII**



Obr. 4.15 Závislost drsnosti R_m na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-VII



Obr. 4.16 Závislost drsnosti R_m na řezné rychlosti v_c pro kotouč s pojivem B-XV

Z naměřených hodnot je vidět, že řezné podmínky (rychlost posuvu stolu v_f , hloubka řezu a_e a řezná rychlost diamantového kotouče v_c) nemají vliv na velikost drsnosti povrchu obrobené plochy.

Na drsnost povrchu má vliv zrnitost brusného kotouče. Čím bude broušený materiál tvrdší, tím drsnost povrchu bude nižší, protože zrna kotouče budou pronikat do malé hloubky.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Při konstrukci součástí je zapotřebí provádět komplexní zhodnocení, který materiál použít při výrobě požadované součásti. V některých případech se vyplatí vyrobit součást z keramického materiálu i přes vyšší vynaložené náklady na součást. Tyto vyšší náklady jsou v budoucnu kompenzovány vysokou spolehlivostí a životností zařízení i hmotností zařízení.

Například při výrobě ložisek z keramických materiálů, které jsou odolné proti únavě a vysokým teplotám a ztrátě mazných vlastností lépe než kovy. Nízká hustota keramiky má za následek nižší odstředivé zatížení, nižší prokluzování při vyšších rychlostech a z toho plyne vyšší životnost komponent ve srovnání s ocelí. Ložiska z keramického materiálu se využívají u tzv. hybridních kuličkových ložisek (ložiska s keramickými kuličkami a ocelovými klecemi).

Při srovnávání řezných nástrojů z nástrojových ocelí (slnutých karbidů) a keramických řezných materiálů dojdeme k závěru, že keramické řezné materiály mají delší životnost a odolnost proti vysokoteplotním deformacím a mohou se použít i za vysokoteplotních podmínek, které panují při velmi vysokém obrábění. Tímto způsobem lze snížit náklady na řezný materiál.

Použití žárových nástřiků u strojních součástí je způsob, který se v současné době uplatňuje stále častěji. Úpravy povrchu zlepšují fyzikální vlastnosti součásti jako je pevnost v tahu, pevnost v tlaku, odolnost proti otěru, ochrana proti mechanickému poškození a zvýšení životnosti zařízení. Předností součástí s keramickými povlaky je možnost dosažení dobré jakosti, tak i možnosti dosažení celkově nižších nákladů při obvyklé jakosti. Ekonomický faktor je jedním z rozhodujícím faktorů pro zavedení technologie žárového nástřiku.

ZÁVĚR

Vývoj nových keramických materiálů současné době pokročil tak, že lze tyto materiály používat v oblasti konstrukčních aplikací. Keramické materiály jsou buď ve formě kompaktních součástí nebo ve formě tenkých povlaků na povrchu kovových dílců. Typická vlastnost keramiky je tvrdost, odolnost proti vysokým teplotám, nízká měrná hmotnost, délková roztažnost, velký měrný povrch a odolnost proti chemickým vlivům.

V praxi se častěji setkáváme tím, že konstruktér klade čím dál větší důraz na výrobu tvrdších a pevnějších součástí, z hlediska jejich spolehlivosti a životnosti. U těchto součástí je většinou požadována vysoká kvalita a přesnost obrábění a zároveň co nekratší termín dodání a co možná nejnížší výrobní cena. Z tohoto důvodu se stále hledají nové způsoby, jak technicko-ekonomicky zabezpečit optimální metodu obrábění a přitom dodržet předepsanou přesnost a jakost výrobku.

S ohledem na charakteristické vlastnosti keramiky (vysoká křehkost, rozptyl pevnosti, nižší pevnost v tahu) je nutno při konstruování dbát zásad.

- co nejpřesněji specifikovat pracovní podmínky a požadavky na danou součást,
- vymezit požadavky na její životnost i bezpečnost a zvolit způsob zajištění provozní spolehlivosti,
- vybrat vhodný materiál a získat potřebné údaje o jeho vlastnostech,
- při vlastní návrhu respektovat typické vlastnosti křehkých materiálů,
- dimenzovat součást s přihlédnutím k možným tvarovým a jiným odchylkám.

V oblasti obrábění nových konstrukčních keramických materiálů je nejeфекtivnější metodou broušení pomocí diamantovým nástrojů. Při volbě řezných podmínek lze pracovat běžným, kyvadlovým, hloubkovým nebo rázovým způsobem. Keramické materiály lze také obrábět vodním paprskem a ultrazvukem, lámáním, sekáním a dělení kontrolovaným lomem.

Ze zkoušek broušení je viditelné, že keramický vzorek Rocar S na bázi SiC lze provádět efektní broušení diamantovými kotouči s pryskyřičným pojivem. Kotouč, který má měkčí pojivo nám ukazuje lepší řezivost než kotouč s tvrdším pojivem. Při kyvadlovém broušení dochází k oddělování třísky hlavně křehkým lomem. Z hlediska úběru materiálu, nákladů a kvality povrchu obrobene plochy lze nejeфекtivnější metodou obrábění keramiky považovat broušení diamantovým kotoučem. Podmínky a druh brousícího kotouče nemají vliv na drsnost povrchu obrobene plochy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, K., PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. 1. vyd., VUT Brno, 2001, 270 s
2. MOHYLA, M.: *Nekonvenční strojírenské materiály I*. 1. vyd., VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1994, 133 s
3. SANDVIK CZ: *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. 1. vyd., faSandvik CZ, 1997
4. HUMÁR, A.: *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd., Brno, CCB s.r.o., 1995, 265 s
5. MENČÍK, J.: *Pevnost a lom skla a keramiky*. 1. vyd., Praha, SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1990, 389 s.
6. POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek* (kovy - keramika - plasty). 1. vyd., VUT Brno, PC-DIR, s.r.o.- Nakladatelství Brno, 1994, 385 s.
7. PTÁČEK, L. A KOLEKTIV: *Nauka o materiálu I*. 1. vyd., Brno, Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2003, 516 s
8. PTÁČEK, L. A KOLEKTIV: *Nauka o materiálu II*. 1. vyd., Brno, Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2003, 392 s
9. KARAFIÁTOVÁ, S., LANGER, I.: *Nekonvenční technologie*. 1. vyd., nakladatelství FRAGMENT, 1998, 164 s
10. LACH, V.: *Keramika*. 3. vyd., Brno, nakladatelství VUT v Brně, 1992, 172 s
11. MÍŠEK, B.: *Polymery, keramika, kompozity*. 1. vyd., VUT Brno, 1993, 155 s
12. KOLEKTIV: *Progresivní a nekonvenční technologie obrábění*., Praha, Dům techniky ČSVTS, 106 s
13. JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J.: *Perspektivní materiály*. 1. vyd., ČVUT Praha, 1995, 122s
14. BÍLEK, O.: *Fyzikálně mechanické zákonitosti procesu obrábění - 1.díl*. 1. díl., VŠB -TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1994, 138 s
15. BÍLEK, O.: *Obrábění II – 2 díl.*, 1.vyd., VŠB -TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1995, 118 s
16. MATSUMOTO, H. *Power coupler issues in normal conducting and Superconducting accelerator applications. In Proceedings of the 1999 Par-*

- ticle Accelerator Conference*. New York, 1999. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://lcdev.kek.jp/Conf/PAC99/THCR1.pdf>>. Application of hip technology. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.nittan.co.jp/english/>>.
17. CERAM TEC: *Charakteristické vlastnosti keramického materiálu SSiC ROCAR S*. [online], Dostupné na World Wide Web: <http://www.ceramtec.com/co/cz/materialy/00139,0001,0000,5138.php>
 18. HUMÁR, A.: *Materiály pro řezné nástroje*, MM publishing, s.r.o., Praha. 2008., 235 s
 19. Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 16, Machining. ASTM International, USA, March 1989, 944 pp.
 20. NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ:. MM Průmyslové spektrum. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni>>.
 21. ŘÍČKA J., BULLA V: *Technologie obrábění a montáže – Cvičení a vyřešené příklady*, VUT Brně, 3 vyd., 1988, 230 s
 22. CHLADIL J., HUMÁR A.: *Teorie obrábění – Příklady a cvičení*. 1.vyd., VUT Brno, 1991, 64 s

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ε	[-]	poměrné prodloužení
σ	[MPa]	napětí
μ	[-]	Poissonovo číslo
E, E_0	[GPa]	modul pružnosti v tahu
V_p	[-]	objemový podíl pórů
a, b	[-]	konstanty
T	[°C]	teplota
t	[s]	čas
K_{IC}	[MPa m ^{1/2}]	lomová houževnatost
ρ	[g cm ⁻³]	hustota
R_m	[MPa]	pevnost v tahu
σ	[MPa]	pevnost v ohybu
HV10	[Pa]	tvrdost
G	[-]	poměrný obrus
μ	[-]	součinitel tření
w	[μm]	průměrná rozteč zrn brusiva v kotouči
ΔT	[°C]	odolnost proti teplotním výkyvům
λ	[μm]	vlnová délka
P	[-]	pórovitost
F_c	[N]	řezná (tangenciální) síla
F_p	[N]	pasivní (radiální) síla
F_t	[N]	posunová síla
F	[N]	výsledná síla při broušení
B	[mm]	šířka broušené plochy
v_c	[m s ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[m.min ⁻¹]	posunová rychlost
a_e	[μm]	pracovní záběr ostří
l	mm	délka
ρ	[g cm ⁻³]	měrná hmotnost
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná vodivost
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
R_m	[μm]	největší výška profilu
P_f	[W]	příkon potřebný k obrábění
P_o	[W]	příkon stroje při běhu naprázdno
P_m	[W]	příkon při zatížení obráběcího stroje při odebírání třísky
η	[-]	účinnost hnacího elektromotoru
N	[-]	jeden záběr nesousledně
S	[-]	jeden záběr sousledně
TS	[-]	tlakově slinováno
RS	[-]	reakčně slinováno

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Naměřené hodnoty sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-VII
Příloha 2 Naměřené hodnoty sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-XV
Příloha 3 Naměřené hodnoty sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-XV
Příloha 4 Naměřené hodnoty sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-VII
Příloha 5 Střední hodnoty naměřených sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-II
Příloha 6 Střední hodnoty naměřených sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-II
Příloha 7 Střední hodnoty naměřených sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-XV
Příloha 8 Střední hodnoty naměřených sil F_p a F_c pro kotouč s pojivem B-XV
Příloha 9 Drsnost povrchu po broušení kotoučem s pojivem B-VII
Příloha 10 Drsnost povrchu po broušení kotoučem s pojivem B-XV

Příloha 1